

46414

**FARKLI İNCELİKLERDEKİ UÇUCU KÜLLERİN  
BETONDAKİ PERFORMANSLARININ  
KARŞILAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Ahmet GÖKÇE**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 Ağustos 1995**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Ağustos 1995**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet UYAN**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Saim AKYÜZ**

**Doç. Dr. Hulusi ÖZKUL**

**AĞUSTOS 1995**

**F.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOĞRULAMA KURULU**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimin son aşaması olan bu çalışmanın hazırlanmasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, değerli düşünceleri ile beni doğruya yönlendiren yönetici hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet UYAN' a teşekkürlerimi arz ederim.

Çalışmalarımın başından sonuna kadar her zaman desteğini arkamda hissettiğim, birlikte çalışmaktan kıvanç duyduğum hocam Sayın Prof. Dr. Erbil ÖZTEKİN'e duyduğum minneti ifade etmeyi bir borç bilirim.

Tezin yazımı tamamlandıktan sonra çalışmayı okuyarak hatalı ve gözden kaçan yerleri düzelteren, değerli eleştirilerini esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. Hulusi ÖZKUL'a teşekkürlerimi sunarım.

İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi Elektronik Mikroskopu Laboratuvarında uçucu kül numunelerinin incelenmesi için gösterdiği ilgiden dolayı Sayın Prof. Dr. Erman TULGAR' a teşekkür ederim.

İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalındaki araştırma görevlisi arkadaşlarıma yardım ve desteklerinden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmam ile ilgili olarak gönderdiği dokümanlarla gösterdiği ilgiden dolayı Mr. MALHOTRA' ya teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul, 2 Ağustos 1995

Ahmet GÖKÇE

## İÇİNDEKİLER

|                                                                              |      |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ                                                                        | ii   |
| SEMBOL LİSTESİ                                                               | v    |
| ŞEKİL LİSTESİ                                                                | vi   |
| TABLO LİSTESİ                                                                | x    |
| ÖZET                                                                         | xii  |
| SUMMARY                                                                      | xiii |
| BÖLÜM 1 GİRİŞ                                                                | 1    |
| BÖLÜM 2 GENEL BİLGİLER                                                       | 4    |
| 2.1 Puzolanlar ve Puzolanik Reaksiyon                                        | 4    |
| 2.2 Uçucu Külün Betonda Kullanımı                                            | 5    |
| 2.2.1 Uçucu Kül                                                              | 5    |
| 2.2.2 Uçucu Küllerin Fiziksel, Kimyasal ve Minerolojik Özellikleri           | 6    |
| 2.2.3 Uçucu Küllü Betonları Oranlama Metodları                               | 10   |
| 2.2.4 Uçucu Külün Taze Beton Özelliklerine Etkisi                            | 18   |
| 2.2.5 Uçucu Külün Sertleşmiş Betonun Yapısal Özellikleri Üzerindeki Etkileri | 28   |
| 2.2.6 Betonun Ortam Şartlarına Dayanıklılığı Üzerinde Uçucu Külün Etkisi     | 37   |
| 2.2.7 Beton ile İlgili Bazı Özel Uygulamalarda Uçucu Külün Kullanımı         | 51   |
| BÖLÜM 3 DENEYSEL ÇALIŞMALAR                                                  | 59   |
| 3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler                              | 59   |
| 3.1.1 Seyitömer Termik Santral Uçucu Külü ve Özellikleri                     | 59   |
| 3.1.2 Çimento                                                                | 64   |
| 3.1.3 Agregalar                                                              | 66   |
| 3.2 Üretilen Betonların Özellikleri                                          | 67   |
| 3.3 Taze Beton Deneyleri                                                     | 67   |
| 3.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri                                               | 67   |
| 3.5 Üretilen Serilere ait Karışım Hesapları                                  | 68   |
| BÖLÜM 4 DENEY SONUÇLARI                                                      | 70   |
| 4.1 Taze Beton Deney Sonuçları                                               | 70   |
| 4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları                                         | 70   |

|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>BÖLÜM 5 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ</b>               | <b>75</b>  |
| 5.1 Taze Beton ile İlgili Sonuçların Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi            | 75         |
| 5.1.1 Taze Betonun Su İhtiyacı                                                   | 75         |
| 5.2 Sertleşmiş Beton Deneylerine ait Sonuçların Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi | 78         |
| 5.2.1 Basınç Dayanımı                                                            | 78         |
| 5.2.2 Eğilme Dayanımı                                                            | 89         |
| 5.2.3 Ultrases Hızı                                                              | 101        |
| 5.2.4 Dinamik Elastisite Modülü                                                  | 105        |
| 5.2.5 Kılcal Su Emme, Görünen Poroze (Hacimce Su Emme) ve Birim Ağırlık          | 108        |
| 5.2.6 Islanma-Kuruma Çevriminin Olduğu Deniz Suyu Ortamının Etkisi               | 109        |
| <b>BÖLÜM 6 SONUÇLAR</b>                                                          | <b>111</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                                 | <b>116</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                                  | <b>118</b> |

## SEMBOL LİSTESİ

|          |                                                                      |
|----------|----------------------------------------------------------------------|
| $C$      | : Bir $x$ uzaklığında, $t$ zaman sonraki klorid iyonu konsantrasyonu |
| $D_e$    | : Klor iyonu difüzyon sabiti                                         |
| $E_d$    | : Dinamik elastisite modülü                                          |
| $k$      | : Etkinlik faktörü                                                   |
| $N$      | : Dönme hızı                                                         |
| $R$      | : Rezistans faktörü                                                  |
| $T$      | : Torsiyon                                                           |
| $V$      | : Ultrases hızı                                                      |
| $\gamma$ | : Deformasyon hızı                                                   |
| $\tau$   | : Kayma gerilmesi                                                    |
| $\Delta$ | : Birim ağırlık                                                      |
| $\tau_0$ | : Akma sınırı                                                        |
| $\mu_p$  | : Plastik viskozite katsayısı                                        |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                    | <u>Sayfa no</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Şekil 2.1 Basit İkame Metodu ile Oranlanmış Uçucu Küllü Betonda Dayanım Gelişiminin Genel Görünüşü                                                 | 11              |
| Şekil 2.2 Farklı Bağlayıcı Malzeme Harmanları için Herhangi bir Yaştaki Dayanım İlişkileri                                                         | 15              |
| Şekil 2.3 Şahit ve Uçucu Küllü Beton için Dayanım-Yaş İlişkisi                                                                                     | 17              |
| Şekil 2.4 Uçucu Külün İri Partikül İçeriğinin Betonda Eşit İşlenebilirlik için Gerekli Su Miktarı Üzerindeki Etkisi                                | 20              |
| Şekil 2.5 Test Edilen Uçucu Küllü ve Normal Betonlar için Sıcaklık artış eğrileri                                                                  | 25              |
| Şekil 2.6 Yüksek Kireçli Uçucu Kül Kullanarak Yapılmış Betonda Adiabatik Sıcaklık Artışı                                                           | 26              |
| Şekil 2.7 Betonların Basınç Dayanımı Gelişiminde Kür Boyunca Sıcaklık Artışının Etkisi                                                             | 32              |
| Şekil 2.8 Uçucu Küllü ve Normal Betonlar için Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkileri                                                                  | 35              |
| Şekil 2.9 Uçucu Küllü Betonların Sünme Davranışları                                                                                                | 36              |
| Şekil 2.10 Yüksek Kalsiyumlu Uçucu Kül Kullanılmış Betonların Rötresi                                                                              | 37              |
| Şekil 2.11 14 Günlük Kürden Sonra Hava Sürüklenmiş Uçucu Küllü Betonlar için Donma-Çözülme Çevrimi Sayısına Bağlı Olarak Meydana Gelen Kütle Kaybı | 42              |
| Şekil 2.12 Betonların Bir Ay Değişik Şiddetlerde Yüksek Sıcaklığa Maruz Kaldıktan Sonraki Basınç Dayanımları                                       | 44              |
| Şekil 2.13 Yüksek Kireçli Uçucu Kül İçeren Betonların Sülfat Genleşmesi                                                                            | 47              |
| Şekil 3.1 İnce Uçucu Küle ait Granülometrik Analiz                                                                                                 | 60              |
| Şekil 3.2 Orta İncelikteki Uçucu Küle ait Granülometrik Analiz                                                                                     | 61              |
| Şekil 3.3 İri Uçucu Küle ait Granülometrik Analiz                                                                                                  | 61              |

|            |                                                                                                           |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.4  | TS 707 Referans ve Karışım Granulometri Eğrileri                                                          | 66 |
| Şekil 5.1  | İnce Uçucu Kül Taneciklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Tipik Görüntüsüne ait Resim          | 76 |
| Şekil 5.2  | İri Uçucu Kül Taneciklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Tipik Görüntüsüne ait Resim           | 77 |
| Şekil 5.3  | Taramalı Elektron Mikroskobu ile Çekilmiş, İri Uçucu Külün Süngersi Dokusunu Gösteren bir Resim           | 78 |
| Şekil 5.4  | Farklı İnceliklerdeki %10 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları                          | 79 |
| Şekil 5.5  | Farklı İnceliklerdeki %20 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları                          | 80 |
| Şekil 5.6  | Farklı İnceliklerdeki %30 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları                          | 81 |
| Şekil 5.7  | Farklı İkame Oranlarında İnce Uçucu Kül İçeren Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları                  | 82 |
| Şekil 5.8  | Farklı İkame Oranlarında Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları        | 83 |
| Şekil 5.9  | Farklı İkame Oranlarında İri Uçucu Kül İçeren Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları                   | 84 |
| Şekil 5.10 | %10 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Dayanımına Oranla Yaşa Göre Kazandıkları Basınç Dayanımları    | 86 |
| Şekil 5.11 | %20 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Dayanımına Oranla Yaşa Göre Kazandıkları Basınç Dayanımları    | 86 |
| Şekil 5.12 | %30 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Dayanımına Oranla Yaşa Göre Kazandıkları Basınç Dayanımları    | 87 |
| Şekil 5.13 | %10 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Basınç Dayanımlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması        | 88 |
| Şekil 5.14 | %20 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Basınç Dayanımlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması        | 88 |
| Şekil 5.15 | %30 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Basınç Dayanımlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması        | 89 |
| Şekil 5.16 | Farklı İnceliklerdeki %10 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki | 90 |

|            |                                                                                                                       |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.17 | Farklı İnceliklerdeki %20 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki             | 91  |
| Şekil 5.18 | Farklı İnceliklerdeki %30 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki             | 92  |
| Şekil 5.19 | İnce Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranına Göre Eğilme Dayanımındaki Değişim                                       | 93  |
| Şekil 5.20 | Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranına Göre Eğilme Dayanımındaki Değişim                             | 94  |
| Şekil 5.21 | İri Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranına Göre Eğilme Dayanımındaki Değişim                                        | 95  |
| Şekil 5.22 | %10 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Eğilme Dayanımına Oranla Yaşa Bağlı Olarak Kazandıkları Eğilme Dayanımları | 97  |
| Şekil 5.23 | %20 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Eğilme Dayanımına Oranla Yaşa Bağlı Olarak Kazandıkları Eğilme Dayanımları | 97  |
| Şekil 5.24 | %30 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Eğilme Dayanımına Oranla Yaşa Bağlı Olarak Kazandıkları Eğilme Dayanımları | 98  |
| Şekil 5.25 | %10 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Eğilme Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Karşılaştırılması          | 99  |
| Şekil 5.26 | %20 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Eğilme Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Karşılaştırılması          | 99  |
| Şekil 5.27 | %30 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Eğilme Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Karşılaştırılması          | 100 |
| Şekil 5.28 | Farklı İnceliklerdeki %10 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Ultrases Hızları Arasındaki İlişki               | 101 |
| Şekil 5.29 | Farklı İnceliklerdeki %20 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Ultrases Hızları Arasındaki İlişki               | 102 |
| Şekil 5.30 | Farklı İnceliklerdeki %30 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Ultrases Hızları Arasındaki İlişki               | 103 |
| Şekil 5.31 | %10 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Ultrases Hızlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması                      | 104 |
| Şekil 5.32 | %20 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Ultrases Hızlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması                      | 104 |

|            |                                                                                                             |     |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.33 | %30 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Ultrases Hızlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması            | 105 |
| Şekil 5.34 | %10 İkame Oranlı Serilerin Dinamik Elastisite Modüllerinin İncelik Faktörüne Bağlı Olarak Karşılaştırılması | 107 |
| Şekil 5.35 | %20 İkame Oranlı Serilerin Dinamik Elastisite Modüllerinin İncelik Faktörüne Bağlı Olarak Karşılaştırılması | 107 |
| Şekil 5.36 | %30 İkame Oranlı Serilerin Dinamik Elastisite Modüllerinin İncelik Faktörüne Bağlı Olarak Karşılaştırılması | 108 |



## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                             | <u>Sayfa no</u> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Tablo 2.1 Puzolanların Sınıflandırılması ve Türleri                                                                                         | 4               |
| Tablo 2.2 Tip I Portland Çimentosu ve Uçucu Küllerin Tipik Kimyasal Kompozisyonları                                                         | 7               |
| Tablo 2.3 Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Kimyasal Kompozisyonları                                                                            | 8               |
| Tablo 2.4 Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Mineralojik Kompozisyonları                                                                         | 8               |
| Tablo 2.5 Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Fiziksel Özellikleri                                                                                | 9               |
| Tablo 2.6 28. Günde Eşit Dayanım Elde Etmek Üzere Oranlanmış Şahit ve Uçucu Küllü Betonlar için Örnek Karışım Oranları                      | 17              |
| Tablo 2.7 Taze Yüksek Mukavemetli Betonların Karışım Oranları ve Özellikleri                                                                | 53              |
| Tablo 2.8 Bazı Rolkritler için Karışım Oranları                                                                                             | 54              |
| Tablo 3.1 Uçucu Kül Numunelerinin Kimyasal Kompozisyonları                                                                                  | 63              |
| Tablo 3.2 Çalışmada Kullanılan Uçucu Kül Gruplarının Puzolanik Aktivite İndeksleri                                                          | 64              |
| Tablo 3.3 Çalışmada Kullanılan Çimentonun Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri                                                         | 65              |
| Tablo 3.4 Agregalara ait Elek Analizi Sonuçları, Özgül Ağırlık ve Gevşek Birim Ağırlık Değerleri                                            | 66              |
| Tablo 3.5 Üretilen Serilerin Gerçek Bileşimleri ve Karışım Oranları                                                                         | 69              |
| Tablo 4.1 Taze Beton Deney Sonuçları ve Taze Beton Özellikleri                                                                              | 70              |
| Tablo 4.2 Deney Serilerinden Elde Edilen Basınç Dayanımı Değerleri                                                                          | 71              |
| Tablo 4.3 Deney Serilerinden Elde Edilen Eğilme Dayanımı Değerleri                                                                          | 71              |
| Tablo 4.4 Deney Serilerinden Elde Edilen Ultrases Hızı Değerleri                                                                            | 72              |
| Tablo 4.5 Beton Numunelerin 28. ve 91. Günler için Hesaplanan Birim Ağırlık Değerleri, Hacimce Su Emme Yüzdeleri ve Kapillarite Katsayıları | 72              |

|           |                                                                                                                             |     |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablo 4.6 | Standart Kür Koşullarında ve Deniz Suyu Ortamında Saklanmış Numunelerin 28. ve 91. Günlerdeki Basınç Dayanımları            | 73  |
| Tablo 4.7 | Standart Kür Koşullarında ve Deniz Suyu Ortamında Saklanmış Numunelerin 28. ve 91. Günlerdeki Eğilme Dayanımları            | 73  |
| Tablo 4.8 | Standart Kür Koşullarında ve Deniz Suyu Ortamında Saklanmış Numunelerin 7, 28, 56 ve 91. Günlerdeki Ultrases Hızı Değerleri | 74  |
| Tablo 5.1 | Üretilen Serilerin Sabit İşlenebilirlik için İhtiyaç Duydukları Su Miktarları                                               | 75  |
| Tablo 5.2 | Uçucu Kül İçeren Serilerin Basınç Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Şahit Basınç Dayanımını Karşılama Oranları             | 78  |
| Tablo 5.3 | 28 Günlük Şahit Basınç Dayanımının Yüzdesi Olarak Zamana Bağlı Basınç Dayanımları                                           | 85  |
| Tablo 5.4 | Uçucu Kül İçeren Serilerin Eğilme Dayanımlarının Yaşa Bağlı Olarak Şahit Eğilme Dayanımını Karşılama Oranları               | 90  |
| Tablo 5.5 | 28 Günlük Şahit Eğilme Dayanımının Yüzdesi Olarak Zamana Bağlı Eğilme Dayanımları                                           | 96  |
| Tablo 5.6 | Ultrases Hızı, Birim Ağırlık ve Bu Değerlere Bağlı Olarak Hesaplanan Dinamik Elastisite Modülü Değerleri                    | 106 |

## ÖZET

Bu çalışmada Seyitömer Termik Santralından sağlanmış farklı inceliklerdeki uçucu küllerin betonun önemli bazı özellikleri üzerinde gösterdikleri etkileri karşılaştırılmıştır. Çalışma ana hatlarıyla altı bölümden meydana gelmiştir.

Birinci bölümde çalışmaya giriş yapılarak konunun önemine değinilmiş, araştırmanın genel amacı ve kapsamı açıklanmıştır. İkinci bölümde uçucu küller ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve önceden yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir.

Deneyisel çalışmalar ile ilgili konulara giriş yapılan üçüncü bölümde ise öncelikle bu çalışmada üretilen betonlar için kullanılan malzemeler tanıtılmıştır. Seyitömer uçucu külü, çimento ve agregalar hakkında gerekli bilgiler aktarılmıştır. Üretilen betonlara ait karışım oranları verilmiştir. Bu bölümde son olarak, yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri anlatılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda üretilecek serilerin karışım oranları seçilirken belirli bir yaşta kontrol betonunun performansına ulaşmak gibi bir hedef koyulmamış, bu açıdan karışımlar basit ikame metoduyla, çimento ile uçucu külü bire bir yer değiştirerek oluşturulmuştur. İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilen araştırmada biri kontrol serisi (uçucu külsüz), üçü ince uçucu kül içeren seri, üçü orta incelikte uçucu kül içeren seri ve son üçü de iri uçucu kül içeren seri olmak üzere toplam 10 seri beton üretilmiştir. Her incelikte %10, %20 ve %30 olmak üzere üç ayrı uçucu kül ikame oranı ile çalışılmıştır. Kontrol betonu için çimento dozajı ve uçucu küllü betonlar için toplam bağlayıcı miktarı (çimento+uçucu kül)  $300 \text{ kg/m}^3$  olarak seçilmiştir. Taze beton deneylerinde belirli bir işlenebilirlik değeri elde edebilmek için gerekli olan su miktarları araştırılmıştır. Sertleşmiş betonlar üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases hızı, kılcal su emme, hacimsel su emme, birim ağırlık ve deniz suyu ortamına dayanıklılık deneyleri yapılmıştır.

Dördüncü bölümde taze ve sertleşmiş beton deney sonuçları toplu olarak sunulmuştur. Beşinci bölümde elde edilen bu toplu sonuçların değerlendirilmesi ve irdelenmesi yapılmıştır. Son bölümde ise çalışmanın bütününden elde edilen bulgular ışığında ulaşılan sonuçlar açıklanmış ve üzerinde durulması gereken önemli noktalara dikkat çekilmiştir. İncelik faktörünün uçucu küllü betonların özelliklerini bir çok yönden önemli ölçüde etkilediği ortaya çıkarılmıştır.

## SUMMARY

### THE COMPARISON OF THE PERFORMANCES OF FLY ASHES WITH DIFFERENT FINENESS IN CONCRETE

Concrete technology has been changing rapidly. Industrial research has taken the lead in developing new innovative materials for the past 20 years, that, when used to their full potential, greatly enhance the properties of hydraulic cement concrete. Concrete is no longer a mixture of one, two, and three shovels of cement, sand, and coarse aggregate, respectively, but many changes have resulted from the development of technology in new mineral admixtures and chemical admixtures.

The most often used mineral admixture in the modern concrete industry is the pozzolan. Two types of pozzolanic materials are readily available such as natural and artificial. The natural ones which are of volcanic origin such as trass, pumicites and perlite. Those of the second type are man-made pozzolans which include such by-products as fly ash (the burning of coal), blast furnace slag (steel industry) and silica fume (silicon and ferrosilicon manufacture). Of the man-made pozzolans, fly ash is probably the most frequently used in concrete.

Fly ash is “ the finely divided residue resulting from the combustion of ground or powdered coal which is transported from the fire box through the boiler by flue gases ” (ACI 116). It is generally classified as Class F or Class C. Depending on the origin of coals burned, Class F is usually produced by burning anthracite or bituminous coal and Class C is normally produced by burning sub-bituminous coal or lignite.

Fly ash provides many benefits in concrete, some of which are:

- Improved workability
- Reduced bleeding (which could be beneficial or not)
- Improved long-term strength
- Generally reduced generation of heat
- Reduced permeability

In Turkey, 15 million tons of fly ash is provided from coal-fired electrical power plants. Unfortunately, this material almost is not used in construction sector in the country. It is well understood that in a country where cement production rate is 25 million tons annually, it should be kept in mind that 15 million tons of fly ash production is a very big potential. Many countries use almost all of the provided fly ashes in construction sector and also prevent the environmental pollution as a result. The concrete industry, which is rapidly developing in Turkey has reached to the economical and technological level of using this mineral admixture.

The important thing to do is to characterize the fly ashes and use them consciously in construction sector and especially concrete industry of Turkey. The main object of this study is to add more information to the limited knowledge about the fly ashes in Turkey.

The purpose of this study is to compare the performances of the fly ashes of three different fineness that have been obtained from Seyitömer Power Plant. The study is composed of 6 chapters; the first one is the introduction. In this part the attention is drawn on to the importance of the subject and general purpose of the study is explained. In the second chapter, general knowledge about the fly ashes is given and the former studies are compared. In the third chapter, the materials used in concrete production such as fly ashes, cement and aggregates, are explained. The mix proportions of concretes used were given. The fresh and hardened concrete experiments are described also in this chapter. The collected results that are maintained from the experimental studies are given in the forth chapter. In the fifth chapter, the results that are obtained are evaluated and discussed. In the last chapter, the conclusions driven from this study are summarized and attention is drawn to the important points that should be taken into consideration.

By using fly ashes at different replacement ratios and finenesses, total of 10 series of concrete were produced. Table 1 shows the mix proportions of these concretes.

Table 1. The mix proportions of the produced series

| Series | Cement  |                | Fly Ash                     |                        |                | Aggregate                |                    |                   |                |              | Water | W/C+FA |
|--------|---------|----------------|-----------------------------|------------------------|----------------|--------------------------|--------------------|-------------------|----------------|--------------|-------|--------|
|        | Type    | Amount<br>(kg) | Replacement<br>Ratio<br>(%) | Particle<br>Size Class | Amount<br>(kg) | D <sub>max</sub><br>(mm) | C.s.<br>II<br>(kg) | C.s.<br>I<br>(kg) | C.Sand<br>(kg) | Sand<br>(kg) | (kg)  |        |
| 1      | PÇ-32.5 | 300            | 0                           | ...                    | 0              | 16                       | 359                | 721               | 273            | 443          | 228   | 0.76   |
| 2      | PÇ-32.5 | 270            | 10                          | FINE                   | 30             | 16                       | 360                | 720               | 273            | 428          | 232   | 0.77   |
| 3      | PÇ-32.5 | 241            | 20                          | FINE                   | 60             | 16                       | 358                | 719               | 273            | 409          | 232   | 0.77   |
| 4      | PÇ-32.5 | 210            | 30                          | FINE                   | 90             | 16                       | 356                | 715               | 271            | 390          | 237   | 0.79   |
| 5      | PÇ-32.5 | 272            | 10                          | MEDIUM                 | 30             | 16                       | 358                | 719               | 273            | 421          | 232   | 0.77   |
| 6      | PÇ-32.5 | 240            | 20                          | MEDIUM                 | 60             | 16                       | 355                | 713               | 270            | 396          | 236   | 0.79   |
| 7      | PÇ-32.5 | 210            | 30                          | MEDIUM                 | 90             | 16                       | 352                | 709               | 270            | 373          | 244   | 0.81   |
| 8      | PÇ-32.5 | 272            | 10                          | COARSE                 | 30             | 16                       | 358                | 720               | 273            | 414          | 232   | 0.77   |
| 9      | PÇ-32.5 | 239            | 20                          | COARSE                 | 60             | 16                       | 350                | 704               | 267            | 375          | 241   | 0.81   |
| 10     | PÇ-32.5 | 211            | 30                          | COARSE                 | 90             | 16                       | 352                | 707               | 266            | 345          | 251   | 0.83   |

The results maintained from the study of experiments with fresh and hardened concrete are given below in tables.

Table 2. Experimental results about fresh concrete properties

| Series | Replacement Ratio (%) | Particle Size Class | Slump (cm) | Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> ) | Air Content (lt) | Compacity (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------------------|---------------------|------------|----------------------------------|------------------|---------------------------------------------|
| 1      | 0                     | -                   | 12         | 2324                             | 6                | 0.762                                       |
| 2      | 10                    | Fine                | 11.5       | 2313                             | 1                | 0.767                                       |
| 3      | 20                    | Fine                | 12         | 2292                             | 3                | 0.765                                       |
| 4      | 30                    | Fine                | 12         | 2269                             | 2                | 0.761                                       |
| 5      | 10                    | Medium              | 11.5       | 2305                             | 2                | 0.766                                       |
| 6      | 20                    | Medium              | 11.5       | 2270                             | 5                | 0.759                                       |
| 7      | 30                    | Medium              | 12         | 2248                             | 0                | 0.756                                       |
| 8      | 10                    | Coarse              | 11.5       | 2299                             | 2                | 0.766                                       |
| 9      | 20                    | Coarse              | 12.5       | 2236                             | 6                | 0.749                                       |
| 10     | 30                    | Coarse              | 12         | 2222                             | 0                | 0.737                                       |

Table 3. Compressive strenght results maintained from the experimental studies

| Particle Size Class | Replacement Ratio (%) | Compressive Strenght ( N/ mm <sup>2</sup> ) |        |         |         |
|---------------------|-----------------------|---------------------------------------------|--------|---------|---------|
|                     |                       | 3 days                                      | 7 days | 28 days | 91 days |
| -                   | 0                     | 14.9                                        | 22.0   | 32.2    | 35.3    |
| Fine                | 10                    | 12.9                                        | 19.1   | 31.4    | 35.6    |
| Medium              | 10                    | 11.5                                        | 18.7   | 28.6    | 34.5    |
| Coarse              | 10                    | 13.1                                        | 19.4   | 28.9    | 31.2    |
| Fine                | 20                    | 11.9                                        | 18     | 29.0    | 34.1    |
| Medium              | 20                    | 10.9                                        | 17.6   | 28.4    | 31.3    |
| Coarse              | 20                    | 10.3                                        | 16.7   | 24.6    | 27.1    |
| Fine                | 30                    | 8                                           | 13.5   | 25.6    | 30.2    |
| Medium              | 30                    | 7.1                                         | 12.9   | 22.7    | 27.1    |
| Coarse              | 30                    | 7.3                                         | 12.8   | 20.6    | 23.8    |

Table 4. Flexural strenght results maintained from the experimental studies

| Particle Size<br>Class | Replacement<br>Ratio (%) | Flexural Strenght (N / mm <sup>2</sup> ) |        |         |         |
|------------------------|--------------------------|------------------------------------------|--------|---------|---------|
|                        |                          | 3 days                                   | 7 days | 28 days | 91 days |
| -                      | 0                        | 3.1                                      | 4.8    | 6.4     | 7.3     |
| Fine                   | 10                       | 2.7                                      | 3.8    | 6.0     | 7.6     |
| Medium                 | 10                       | 2.6                                      | 3.8    | 5.9     | 7.0     |
| Coarse                 | 10                       | 2.5                                      | 3.9    | 5.7     | 7.0     |
| Fine                   | 20                       | 2.6                                      | 3.6    | 5.9     | 7.2     |
| Medium                 | 20                       | 2.4                                      | 3.7    | 5.6     | 6.5     |
| Coarse                 | 20                       | 2.3                                      | 3.4    | 5.2     | 6.0     |
| Fine                   | 30                       | 1.8                                      | 2.9    | 5.3     | 6.7     |
| Medium                 | 30                       | 1.6                                      | 2.7    | 4.9     | 6.1     |
| Coarse                 | 30                       | 1.6                                      | 3.0    | 4.8     | 5.6     |

Table 5. Pulse velocity results maintained from the experimental studies

| Particle Size<br>Class | Replacement<br>Ratio (%) | Pulse Velocity (km/s) |         |         |         |
|------------------------|--------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
|                        |                          | 7 days                | 28 days | 56 days | 91 days |
| -                      | 0                        | 4.61                  | 4.75    | 4.84    | 4.84    |
| Fine                   | 10                       | 4.41                  | 4.67    | 4.75    | 4.81    |
| Medium                 | 10                       | 4.39                  | 4.67    | 4.73    | 4.80    |
| Coarse                 | 10                       | 4.40                  | 4.67    | 4.71    | 4.77    |
| Fine                   | 20                       | 4.38                  | 4.62    | 4.68    | 4.73    |
| Medium                 | 20                       | 4.36                  | 4.61    | 4.67    | 4.71    |
| Coarse                 | 20                       | 4.26                  | 4.51    | 4.59    | 4.68    |
| Fine                   | 30                       | 4.16                  | 4.58    | 4.63    | 4.67    |
| Medium                 | 30                       | 4.12                  | 4.50    | 4.59    | 4.66    |
| Coarse                 | 30                       | 4.07                  | 4.38    | 4.49    | 4.54    |

Table 6. Experimental results about some physical properties of the hardened concretes

| Particle Size<br>Class | Replacement<br>Ratio (%) | Unit Weight<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |         | Water Absorption<br>(%Volume) |         | Capillarity Coefficient<br>K (cm <sup>2</sup> /s) |                       |
|------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------|-------------------------------|---------|---------------------------------------------------|-----------------------|
|                        |                          | 28 days                             | 91 days | 28 days                       | 91 days | 28 days                                           | 91 days               |
| -                      | 0                        | 2234                                | 2258    | 15.12                         | 11.73   | $5.16 \times 10^{-6}$                             | $2.35 \times 10^{-6}$ |
| Fine                   | 10                       | 2228                                | 2263    | 15.61                         | 9.27    | $6.24 \times 10^{-6}$                             | $8.94 \times 10^{-7}$ |
| Fine                   | 20                       | 2156                                | 2208    | 18.80                         | 14.25   | $6.85 \times 10^{-6}$                             | $2.19 \times 10^{-6}$ |
| Fine                   | 30                       | 2149                                | 2174    | 19.55                         | 15.05   | $8.25 \times 10^{-6}$                             | $4.69 \times 10^{-6}$ |
| Medium                 | 10                       | 2199                                | 2202    | 16.27                         | 12.49   | $7.82 \times 10^{-6}$                             | $3.13 \times 10^{-6}$ |
| Medium                 | 20                       | 2155                                | 2167    | 18.48                         | 17.15   | $8.07 \times 10^{-6}$                             | $4.06 \times 10^{-6}$ |
| Medium                 | 30                       | 2129                                | 2142    | 19.45                         | 18.62   | $8.78 \times 10^{-6}$                             | $4.53 \times 10^{-6}$ |
| Coarse                 | 10                       | 2186                                | 2189    | 16.62                         | 14.88   | $7.73 \times 10^{-6}$                             | $2.49 \times 10^{-6}$ |
| Coarse                 | 20                       | 2133                                | 2139    | 17.23                         | 19.14   | $8.59 \times 10^{-6}$                             | $4.82 \times 10^{-6}$ |
| Coarse                 | 30                       | 2104                                | 2112    | 20.17                         | 19.33   | $1.1 \times 10^{-5}$                              | $5.83 \times 10^{-6}$ |

Table 7. Comparison of the compressive strenghts of the specimens which have been kept in standart cure water and sea water

| Particle Size<br>Class | Replacement<br>Ratio (%) | Compressive Strenght (N/mm <sup>2</sup> ) |         |           |         |
|------------------------|--------------------------|-------------------------------------------|---------|-----------|---------|
|                        |                          | Standart Cure Water                       |         | Sea Water |         |
|                        |                          | 28 days                                   | 91 days | 28 days   | 91 days |
| -                      | 0                        | 32.2                                      | 35.3    | 31.1      | 34.6    |
| Fine                   | 10                       | 31.4                                      | 35.6    | 28.4      | 34.9    |
| Fine                   | 20                       | 29                                        | 34.1    | 25.1      | 28.8    |
| Fine                   | 30                       | 25.6                                      | 30.2    | 23.1      | 28.8    |
| Medium                 | 10                       | 28.6                                      | 34.5    | 26.7      | 30.7    |
| Medium                 | 20                       | 28.4                                      | 31.3    | 24.6      | 29.9    |
| Medium                 | 30                       | 22.7                                      | 27.1    | 19.4      | 25.9    |
| Coarse                 | 10                       | 28.9                                      | 31.2    | 27        | 30.6    |
| Coarse                 | 20                       | 24.6                                      | 27.1    | 20.9      | 25.4    |
| Coarse                 | 30                       | 20.6                                      | 23.8    | 18.4      | 23.4    |

Table 8. Comparison of the flexural strenghts of the specimens which have been kept in standart cure water and sea water

| Particle Size Class | Replacement Ratio (%) | Flexural Strenght (N/mm <sup>2</sup> ) |         |           |         |
|---------------------|-----------------------|----------------------------------------|---------|-----------|---------|
|                     |                       | Standart Cure Water                    |         | Sea Water |         |
|                     |                       | 28 days                                | 91 days | 28 days   | 91 days |
| -                   | 0                     | 6.4                                    | 7.3     | 5.6       | 6.0     |
| Fine                | 10                    | 6.0                                    | 7.6     | 4.7       | 6.1     |
| Fine                | 20                    | 5.9                                    | 7.2     | 4.4       | 5.8     |
| Fine                | 30                    | 5.3                                    | 6.7     | 3.5       | 3.8     |
| Medium              | 10                    | 5.9                                    | 7.0     | 5.2       | 6.1     |
| Medium              | 20                    | 5.6                                    | 6.5     | 4.4       | 4.6     |
| Medium              | 30                    | 4.9                                    | 6.1     | 3.5       | 3.6     |
| Coarse              | 10                    | 5.7                                    | 7.0     | 3.9       | 6.2     |
| Coarse              | 20                    | 5.2                                    | 6.0     | 3.9       | 5.2     |
| Coarse              | 30                    | 4.8                                    | 5.6     | 4.0       | 3.9     |

Table 9. Comparison of the pulse velocity values of the specimens in standart cure water and sea water

| Particle Size Class | Replacement Ratio (%) | Pulse Velocity (km/s) |         |         |         |           |         |         |         |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|
|                     |                       | Standart Cure Water   |         |         |         | Sea Water |         |         |         |
|                     |                       | 7 days                | 28 days | 56 days | 91 days | 7 days    | 28 days | 56 days | 91 days |
| -                   | 0                     | 4.61                  | 4.75    | 4.84    | 4.84    | 4.39      | 4.53    | 4.59    | 4.62    |
| Fine                | 10                    | 4.41                  | 4.67    | 4.75    | 4.81    | 4.37      | 4.44    | 4.57    | 4.62    |
| Fine                | 20                    | 4.38                  | 4.62    | 4.68    | 4.73    | 4.20      | 4.41    | 4.53    | 4.55    |
| Fine                | 30                    | 4.16                  | 4.58    | 4.63    | 4.67    | 3.94      | 4.37    | 4.46    | 4.51    |
| Medium              | 10                    | 4.39                  | 4.67    | 4.73    | 4.80    | 4.35      | 4.50    | 4.55    | 4.67    |
| Medium              | 20                    | 4.36                  | 4.61    | 4.67    | 4.71    | 4.25      | 4.34    | 4.50    | 4.54    |
| Medium              | 30                    | 4.12                  | 4.50    | 4.59    | 4.66    | 3.97      | 4.26    | 4.39    | 4.52    |
| Coarse              | 10                    | 4.40                  | 4.67    | 4.71    | 4.77    | 4.36      | 4.44    | 4.62    | 4.73    |
| Coarse              | 20                    | 4.26                  | 4.51    | 4.59    | 4.68    | 4.12      | 4.39    | 4.49    | 4.59    |
| Coarse              | 30                    | 4.07                  | 4.38    | 4.49    | 4.54    | 3.94      | 4.20    | 4.37    | 4.38    |

Finally the following results are obtained by the evaluation of the experimental study :

1- The fineness factor affects the uniformity of the fly ash. The physical and chemical properties of fly ash from the same source change depending on this factor.

2- Pozollanic activity experiment carried out according to the TS 639 is thought to be inconvenient for fly ash like Seyitömer's which increases the water requirement by a considerable amount.

3- As the fly ash particles gets larger and the replacement ratio increases, the water requirement of fresh concrete also increases. The main reason of this increased water demand of fly ash is the stuructural change occured in it for larger particles, that is, as the size of particles gets larger, they loose their spherical forms and become

shapeless, porous and rough. This structure naturally increases the water requirement.

4- It is understood that the fineness factor shows similar effects on the compressive and flexural strenght developments of the concrete. In the series at early ages the fly ash behaves like an inert compound and the influence of the fineness factor on the strength development does not appear. For this reason, the series with fly ash at the same replacement ratio at early ages take values close to each other independing of fineness. In strenght values of 28 th and 91 st days, the effect of the fly ash fineness appears in considerable levels.

5- From the data obtained by pulse velocity measurements, the effect of the fineness factor at early and later ages for ten percent replacement ratio can not be detected. In the other replacement ratios, also including the values of 7 days, the ultrasonic pulse velocities are affected by the fly ash fineness differences and as the replacement ratio increases, this effect appears more clearly.

6- It is understood that in the series with fine fly ash, generally at later ages, it shows positive contribution to the physical properties of concrete. On the contrary, a positive effect is not seen on physical properties of series including medium fine and large fly ash.

7- Depending on the fineness factor, in marine environment the series of fly ash exposed to wetting-drying cycles, the differentiating data cannot be obtained according to the performances shown to the above mentioned environments. The compressive and flexural strenghts and ultrasonic pulse velocity of the specimens kept in marine environment are smaller than those of the specimens which are kept in standart cure conditions. But, the amount of the decrease depending on the fly ash fineness and replacement ratios is not clear enough to relate them among the series.

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Portland çimentosunun icadı üzerinden 150 yılı aşkın bir sürenin geçmiş olmasına rağmen henüz insanlığın hizmetine teknik ve ekonomik açıdan beton kadar yaygın olarak kullanılabilecek alternatif bir yapı malzemesi sunulamamıştır. Plastik ve hafif kütleli malzeme teknolojilerindeki son gelişmeler yapı malzemeleri üzerine çalışan bir kısım mühendis ve bilim adamına acaba 2000' li yıllarda betona yer yok mu sorusunu sordurmuş ancak tatmin edici bir cevap verememiştir. Bu durumun esas sebebi betonun düşük maliyet/performans oranına ulaşamamış olmasıdır. Görünen şudur ki beton kolay kolay yerini bir başka alternatife bırakacak bir malzeme değildir. Ana hammaddelerinin tabii, bol ve ucuz olması sebebiyle gelecekte de en ekonomik, en çok kullanılan, en az enerji gerektiren ve en iyi çevreyi koruyan yapı malzemesi olmayı sürdürecektir. Belkide yapılması gereken yeni bir alternatif aramak değil, 2000' li yılların ihtiyacına cevap verebilecek beton teknolojisini geliştirmektir. “Ayda kurulacak üs için ay malzemeleri ile beton üretilmesi” gibi konuların araştırıldığı ve tartışıldığı bir devirde, malzeme bilimci de artık geleneksel beton kalıplarından sıyrılmalıdır.

Günümüzde endüstrileşme hızına paralel olarak malzeme ve enerji tasarrufuna verilen önemde artmaktadır. Mevcut malzemelerin geliştirilmesi ve atıl malzemelerin değerlendirilmesi toplum adına mühendise düşen en önemli sorumluluklardan biridir. Mesele inşaat mühendisini ilgilendiren yönüyle ele alındığında sektörel bazda malzeme ve enerji tasarrufunun ülke ekonomisi açısından önemi daha iyi anlaşılacaktır. Türkiye’de yıllık beton üretiminin 40 milyon m<sup>3</sup> olduğu tahmin edilmektedir. Bir m<sup>3</sup> betonun ortalama 1,5 milyon TL olduğu kabul edilirse ülke çapında bir yılda sadece beton için harcanan paranın 60 trilyon TL olduğu göze çarpmaktadır. Hammadde ve enerji kaynaklarının bilinçli ve verimli tüketimi ile bu üretim faktörlerinden %10 tasarruf yapılabildiği varsayılırsa neticede ülke ekonomisine 6 trilyonluk bir kazanç

sağlanacağı ortadadır. İnşaat mühendisi bu sorumluluğunu yerine getirmedeği takdirde bu 6 trilyonu tüm ülke insanı ödemeğe mahkum olacaktır. O halde bu tasarruf ne ile ve nasıl yapılacaktır? Elbetteki bir ürünün performansından taviz vererek tasarruf yapılamaz. İşte bu noktada mühendise teknik gereklere en uygun ve en ekonomik tasarımları ortaya çıkarmak düşmektedir. İnşaat endüstrisi sahip olduğu zengin malzeme yelpazesi ile bu konuda oldukça şanslı sayılabilmekle birlikte bu şansını iyi kullanabildiği ise tartışılır durumdadır.

Atık olarak doğaya terk edilen bir çok yan ürünün malzeme özellikleri incelendiğinde önemli bir miktarının inşaat endüstrisinde kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu yan ürünlerin kullanılması ile hem çevre sorunları hem de bu malzemenin yerini alabileceği doğal malzemelerin tüketimi azalmakta , enerji tasarrufu ve ekonomi elde edilmektedir. Ayrıca bazı atık ürünler kendilerine özgü özellikleri nedeni ile kullanıldıkları alanda teknik yönden daha kaliteli ürünler elde etmeye yaramaktadırlar.

Değişik kaynaklı atık ürünler ele alındığında bunlar arasında ülkemizde değerlendirilmek üzere en büyük potansiyelin uçucu küller olduğu göze çarpmaktadır. Yakıt olarak kömürün kullanıldığı termik santrallarda, elde edilen elektrik enerjisi ile birlikte atık yan ürünler ortaya çıkar. Uçucu kül ortaya çıkan bu çok ince parçacıklara verilen genel addır. Bu tür endüstriyel atıkların depolanması ya da atılması ekonomik ve çevresel açıdan büyük sorun olmaktadır. Kimyasal kompozisyonu itibariyle betonun ana bağlayıcısı olan portland çimentosuna oldukça benzeyen uçucu kül, gerek portland çimentosunun bir kısmını oluşturarak pozolan katkılı çimento üretiminde gerekse beton üretimi sırasında doğrudan doğruya bir kısım çimento yerine kullanılarak bu ekonomik ve çevresel sorunlar kısmen hafifletilebildiği gibi beton maliyeti açısından da küçümsenmeyecek ekonomi sağlanmış olmaktadır. Herşeyden önemlisi betonun taze ve sertleşmiş haldeki performansı hissedilir derecede artmaktadır. Elbetteki her uçucu kül betonda iyileştirici etkinliğe sahip değildir. Bu etkinlik tamamı ile uçucu külün minerolojik ve kimyasal yapısına, aktivitesine, kullanım miktarına ve elde edildiği termik santralin teknolojisine bağlı olmaktadır. Gerçek olan şu ki ilk çalışmaların çoğu eski teknolojiye sahip termik santrallardan elde edilmiş, karbon içeriği yüksek, iri partiküllü F-Sınıfı uçucu küller üzerinde yapılmıştı. Şimdilerde ise mevcut uçucu küllerin çoğu yanmanın yüksek randımanla gerçekleştiği, kömürü toz halinde öğütme ekipmanına sahip, ince partiküllerin

homojen olarak bloke edilebildiği modern termik santrallardan elde edilmektedir. 1950 - 1970 yılları arasındaki yirmi yıllık periyot boyunca uçucu kül kullanımı ile yaşanmış olan sorunların büyük çoğunluğunun artık modern beton uygulamalarında sözü geçmemektedir. Abdun-Nur modern betonun gereklerini dile getirirken aslında uçucu kül hakkındaki bütün bu eskiden kalma ön yargılarına silip atmıştır:

“ Modern betonun gerçek dünyasında uçucu kül de, portland çimentosu, agrega, su ve kimyasal katkıları gibi beton karışımının vazgeçilmez bir unsurudur. Ben çoğu betonda uçucu külü hacimce portland çimentosundan daha çok miktarda kullandım. Bundan dolayıdır ki uçucu kül karışıma bir katkı, bir ilave değildir. Uçucu külsüz ve kimyasal katkısız bir beton sadece müze camakanlarında bulunmalıdır. ” [1]

Bu çalışmanın özünde ülkemize ait değerlendirilmeyi bekleyen bir endüstriyel atığın gerçek karakterini ortaya çıkarmak yolunda küçük bir katkı üretme çabası yatmaktadır. Çalışmada Seyitömer termik santralinden sağlanan iki değişik incelikteki uçucu külün ve bu iki uçucu külün karıştırılması ile elde edilen orta incelikteki uçucu külün betonda belirli oranlarda çimento yerine kullanılması ile uçucu kül inceliğinin betonun mekanik, fiziksel ve durabilite özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Üretilen her seri için taze betonun işlenebilirliği ve su ihtiyacı araştırılarak uçucu kül inceliği ve ikame oranı ile karışımın su ihtiyacı arasındaki ilişki irdelenmiştir. İncelik faktörünün sertleşmiş betonun yapısal özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak amaçlanmıştır.

Üretilen serilerin karışım oranlama metodunu seçerken belirli bir yaşta kontrol betonunun performansına ulaşmak gibi bir hedef koyulmamış, bu açıdan karışımlar basit ikame metoduyla, çimento ile uçucu külü bire bir yer değiştirerek oranlanmışlardır. Uçucu küllü beton karışımların oranlanmasında basit ikame metodunun rasyonel bir metod olmadığını hatırlatmakta fayda vardır.

## BÖLÜM 2

### GENEL BİLGİLER

#### 2.1 Puzolanlar ve Puzolanik Reaksiyon

Puzolanlar modern beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılan doğal veya yapay mineral katkılardır. Betonda kullanılan mineral katkı maddeleri portland çimentosuna benzer minerolojik ve kimyasal bileşimler ile fiziksel özelliklere sahip olmalarına rağmen büyük çoğunluğunun kendi başlarına bağlayıcılık özelliği yoktur. Bu nedenle bu tür maddeler ikincil bağlayıcı malzemeler olarak anılmaktadırlar. Efektif bir dolgu maddesi fonksiyonu görebilen mineral katkılar, puzolanik aktiviteleri nedeni ile hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik göstererek bağlayıcı hamur yapısını değiştirirler[2].

Puzolan, kendi kendine bağlayıcılık karakteri çok az olan veya hiç olmayan ancak ince olarak ufalanmış halde ve ortamda nem bulunması halinde kalsiyum hidroksitle normal sıcaklıklarda reaksiyona girerek bağlayıcı nitelikleri olan bileşikler meydana getirme yeteneğine sahip silisli veya silisli ve alüminli bir malzeme olarak tanımlanır[3]. Puzolanların sınıflandırılması ve türleri Tablo 2.1. de gösterilmiştir[2].

**Tablo 2.1** Puzolanların Sınıflandırılması ve Türleri

| Puzolanlar              |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| Doğal Puzolanlar        | Yapay Puzolanlar         |
| 1. Volkanik cüruflar    | 1. Uçucu kül             |
| 2. Volkanik tüfler      | 2. Yüksek fırın cürufu   |
| 3. Pişmiş (kalsine) kil | 3. Öğütülmüş pişmiş kil  |
| 4. Kil taşı             | 4. Silis dumanı          |
| 5. Çert                 | 5. Pirinç kapçıği külü   |
| 6. Opalin silika        | 6. Demirli olmayan cüruf |

Mineral katkı maddelerinin beton teknolojisinde kullanım yöntemleri puzolanın türüne göre değişebilmektedir. Doğal puzolanlar çoğunlukla katkıli portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar. Bu tür çimentoların kullanılmasıyla betonda önceden belirlenmiş oranlarda puzolan kullanılmış olmaktadır. Yapay puzolanlardan yüksek fırın cürufu ve uçucu küller beton üretiminde iki yoldan kullanılmaktadırlar. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül veya cüruf içeren katkıli portland çimentosu kullanımıyla betona katılmış olur. İkinci yöntemde ise uçucu kül veya ince öğütülmüş cüruf betona karıştırma sırasında çimentoya ilave ya da ikame olarak katılır[2].

Puzolan içeren betonlarda temel puzolanik reaksiyon puzolandaki silika ile portland çimentosu hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç arasında, sulu ortamda gerçekleşmektedir. Puzolanik reaksiyon sonucu portland çimentosunun silikatlı bileşenleri ile aynı hidrate ürünler ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu belirlemesi hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki nedeniyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması ya da alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı ise reaksiyonu hızlandırabilmektedir [2].

Puzolan ve portland çimentosu karışımı hidratasyona girince puzolanik reaksiyonun etkisiyle bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Buna göre belirli bir süre sonunda puzolan içeren betonların çimento hamurunda portland çimentosu hamuruna oranla daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrate elemanları bulunmaktadır. Daha çok bağlayıcı ürün oluşması mukavemet artışına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi geçirimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkilere dayanıklılığı arttırmaktadır[2].

## **2.2. Uçucu Külün Betonda Kullanımı**

### **2.2.1. Uçucu Kül**

Termik santrallarda enerji üretiminde yakıt olarak kullanılan pulverize kömür atık olarak değişik karakterde küllerin ve cürufun ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Modern termik santrallarda en önemli atık malzeme, yanma nedeni ile baca tarafından çekilen gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen (uçan) çok ince kül parçacıklarıdır. Bu ince kül parçacıkları elektrofiltrelerde (elektrostatik yöntemlerle) ve siklonlarda yakalanmakta, baca gazları ile atmosfere çıkışları önlenmektedir. Bu şekilde elde edilen çok ince küle uçucu kül (fly ash) adı verilmektedir. Uçucu küllerin yanı sıra

bir miktar iri parçalı kül baca gazları ile yukarı taşınamayarak yanıp kazanın tabanına düşmekte ve "taban külü" adını almaktadır[4].

Uçucu kül terimi 1930' lu yıllarda elektrik gücüne dayalı endüstrinin gelişmesi ile yayılmaya başladı. Uçucu külün betonda kullanımı ile ilgili ilk kapsamlı bilgi 1937 yılında Kuzey Amerika' da Davis tarafından hazırlandı[1]. 1970' li yıllarda enerji maliyetindeki hızlı artışa paralel olarak çimentonun da önemli derecede pahalalanmasıyla uçucu kül tüm dünya genelinde kabul görmeye başladı.

### 2.2.2. Uçucu Küllerin Fiziksel, Kimyasal ve Minerolojik Özellikleri

Tipik olarak küresel şekle sahip uçucu kül taneciklerinin çapları 1 ila 150  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Bu taneciklerin çoğunluğunun çapı 45  $\mu\text{m}$ ' den daha azdır. Herhangi bir uçucu külün tane çapı dağılımı ekseriyetle kullanılan toz toplama ekipmanının tipine bağlı olarak farklılık gösterir. Bazı mekanik santrallarda kullanılan mekanik kollektörlerde toplanan uçucu kül elektrostatik filtrelerin kullanıldığı santrallardaki uçucu küle nazaran daha iridir.

Uçucu külün kimyasal kompozisyonu incelendiğinde çoğu uçucu külün %95'inden fazlasının silisyum, alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum elementlerinden oluşan kimyasal bileşikleri ve camsı formları içerdiği görülmektedir. Genel olarak, linyit kömürünün yanması ile oluşan uçucu kül bitümlü kömürden elde edilen uçucu küle nazaran daha çok kalsiyum ve daha az demir ihtiva eder. Bir miktar yanmamış kömür karbon tanecikleri olarak uçucu kül ile birlikte toplanır. Linyit kömüründen elde edilen uçucu kül genelde çok az yanmamış karbon içerir.

Kanada ve Amerika standart ve spesifikasyonları uçucu külleri kompozisyonlarını ve orijinlerini yansıtan iki sınıfta tanımlamaktadır:

C sınıfı : Linyit ya da alt sınıf bitümlü kömürden elde edilen uçucu küller.

F sınıfı : Antrasit ya da bitümlü kömürden elde edilen uçucu küller.

C sınıfı uçucu küller çimento olmaksızın kendi kendine sertleşme özelliğine sahip olmaları açısından F sınıfı küllerden farklıdır. İki uçucu kül sınıfı arasında en çok dikkati çeken bu kimyasal fark C sınıfı küllerin yüksek düzeyde CaO içermesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum uçucu külleri sınıflandırırken alternatif ve bazı yönleri ile tercih edilebilen bir terminolojinin kullanılmasına müsaade eder. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları içerisinde CaO %10' dan fazla ise bu tür küller "yüksek kireçli uçucu kül" daha az ise "düşük kireçli uçucu kül" olarak anılmaktadırlar. Tablo 2.2 de Tip I portland çimentosu, F ve C sınıfı uçucu küllerin tipik kimyasal kompozisyonları karşılaştırılmıştır. Bu tabloda anlaşılmaktadır ki Portland

çimentosuna ilaveten betona katılan F ya da C sınıfı uçucu küllerdeki metalik ve metalik olmayan oksitler zaten portland çimentosunda mevcut olan bileşiklerdir. Diğer bir deyişle çimentonun kimyasal bileşenlerine ilave yeni ya da yabancı bir unsurun katılması söz konusu değildir.[5].

**Tablo 2.2** Tip I Portland Çimentosu ve Uçucu Küllerin Tipik Kimyasal Kompozisyonları

| Kimyasal Kompozisyon                    | TIP 1<br>Çimento (%) | F SINIFI<br>U. Kül (%) | C SINIFI<br>U. Kül (%) |
|-----------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                        | 19.8                 | 43.4                   | 32.5                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | 6.1                  | 18.5                   | 21.9                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | 2.5                  | 26.9                   | 5.1                    |
| CaO                                     | 63.7                 | 4.3                    | 27.4                   |
| SO <sub>3</sub>                         | 2.2                  | 1.2                    | 2.8                    |
| MgO                                     | 3.5                  | 0.9                    | 4.8                    |
| Total Alkali (Na <sub>2</sub> O olarak) | 0.9                  | 0.6                    | 1.1                    |
| Kızdırma Kaybı                          | 1.0                  | 3.2                    | 1.2                    |
| Rutubet                                 | —                    | 0.2                    | 0.8                    |

Mustafa Tokyay [6] ODTÜ’de yürütülmüş olan araştırmalardan elde edilen verilere dayanarak Türkiye uçucu küllerinin kimyasal ve minerolojik kompozisyonları ile fiziksel özelliklerini değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlar tüm uçucu küller için bir genellemeye gidilmesine izin vermemekle birlikte bir fikir sahibi olunmasını sağlayacak düzeydedir. Bir çok standartta olduğu gibi TS 639 ' da da uçucu küllerin SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının en az %70 olması gerektiği belirtilmiştir. Bu uçucu küllerden üç tanesi bu şartı sağlamaktadır. Öte yandan, ASTM C 618 standardı uçucu külleri hem kimyasal kompozisyonlarına hem de elde edildikleri kömürün cinsine göre sınıflandırmaktadır. Buna göre çalışılan uçucu küllerin yalnız biri F tipi (S+A+F > %70 ve taş kömüründen elde edilmiş), diğerleri C tipi (S+A+F > %50 ve linyitten elde edilmiş) dir. Birincisi dışındaki tüm uçucu küller ASTM C 618 şartlarını sağlamaktadır. Buradaki uçucu küllerden ikisi düşük kireçli (CaO < %10), diğerleri yüksek kireçlidir (CaO > %10).

Sözü edilen uçucu küllerin kimyasal ve minerolojik kompozisyonları ile fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 2.3, Tablo 2.4 ve Tablo 2.5 de verilmiştir.

**Tablo 2.3** Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Kimyasal Kompozisyonları

| Oksit (%)                      | UÇUCU KÜL          |           |           |        |           |         |                     | ASTM C 618 |      |
|--------------------------------|--------------------|-----------|-----------|--------|-----------|---------|---------------------|------------|------|
|                                | Afşin-<br>Elbistan | Çatalağzı | Seyitömer | Soma-B | Tunçbilek | Yatağan | TS 639<br>Sınırları | Sınırları  |      |
|                                |                    |           |           |        |           |         |                     | F          | C    |
| SiO <sub>2</sub>               | 27.4               | 56.8      | 40.6      | 39.8   | 56.4      | 51.2    | -                   | -          | -    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.8               | 24.1      | 9.1       | 22.3   | 23.0      | 22.9    | -                   | -          | -    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.5                | 6.8       | 7.7       | 4.4    | 10.1      | 7.8     | -                   | -          | -    |
| S+A+F                          | 39.7               | 87.7      | 57.4      | 66.5   | 89.5      | 81.9    | >70                 | >70        | >50  |
| CaO                            | 47                 | 1.4       | 19.9      | 25.4   | 2.1       | 13.0    | -                   | -          | -    |
| MgO                            | 2.5                | 2.4       | 8.1       | 1.9    | 3.3       | 2.8     | <5                  | <5         | <5   |
| SO <sub>3</sub>                | 6.2                | 2.9       | 10.6      | 4.8    | 0.4       | 0.3     | <5                  | <5         | <5   |
| Alkali                         | 0.3                | 3.0       | 1.4       | 0.4    | 0.9       | 2.9     | -                   | <1.5       | <1.5 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.7                | 1.1       | n.d       | 0.6    | n.d       | 0.9     | -                   | -          | -    |
| LOI                            | 2.4                | 0.6       | 1.4       | 0.4    | 1.1       | 0.4     | <10                 | <12        | <6   |

**Tablo 2.4** Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Minerolojik Kompozisyonları

| Mineral (%)        | Uçucu Kül          |           |           |        |           |         |
|--------------------|--------------------|-----------|-----------|--------|-----------|---------|
|                    | Afşin-<br>Elbistan | Çatalağzı | Seyitömer | Soma-B | Tunçbilek | Yatağan |
| Mullit             | 1.0                | 18.1      | 1.2       | 4.3    | 8.8       | 6.0     |
| Kuartz             | 4.5                | 10.9      | 5.6       | 5.1    | 13.9      | 22.4    |
| Magnetit           | 0.8                | 0.2       | 2.5       | 0.6    | 4.1       | 2.9     |
| Hematit            | 4.0                | 0.1       | 6.0       | 2.0    | 3.0       | 7.0     |
| Serbest CaO        | 18.6               | 0.7       | 5.5       | 9.8    | 0.9       | 1.0     |
| Anhidrit           | 12.2               | -         | 9.3       | 7.4    | -         | -       |
| Plagioclase        | ~28                | -         | ~15       | ~20    | -         | ~25     |
| Camsı ve amorf faz | ~30                | ~70       | ~50       | ~50    | ~70       | ~35     |

**Tablo 2.5** Bazı Türkiye Uçucu Küllerinin Fiziksel Özellikleri

| Özellik                    |                                  | Uçucu Kül      |           |           |        |           |         |
|----------------------------|----------------------------------|----------------|-----------|-----------|--------|-----------|---------|
|                            |                                  | Afşin-Elbistan | Çatalağzı | Seyitömer | Soma-B | Tunçbilek | Yatağan |
| İncelik<br>(%kalan)        | 200 um                           | 3.0            | 2.7       | 1.0       | 3.0    | 4.5       | 1.9     |
|                            | 90 um                            | 14.9           | 11.5      | 3.0       | 19.0   | 13.5      | 12.8    |
| Özgül<br>Ağırlık           | elek                             | 2.63           | 1.97      | 2.46      | 2.42   | 1.99      | 2.15    |
| P.A.I                      | Kireçle<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) | 49.7           | 45.1      | 43.8      | 52.5   | 34.0      | 36.0    |
|                            | P.C. ile<br>(% Kontrol)          | 86.4           | 77.2      | 79.8      | 94.5   | 72.5      | 67.3    |
| Su ihtiyacı<br>(% kontrol) |                                  | 111.8          | 102.7     | 112.4     | 110.0  | 104.2     | 106.5   |

Uçucu kül özgül ağırlığı genel olarak 1.97 ile 3.02 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişmekle birlikte bazı uçucu kül tanecikleri 1.0 gr/cm<sup>3</sup>, ten daha az özgül ağırlığa sahip olarak suyun üzerinde yüzebilmektedirler. Uçucu küldeki demirli bileşen miktarı fazla olduğu takdirde özgül ağırlık daha yüksek olmakta, karbon miktarı fazla olduğunda ise daha düşük olmaktadır.

Uçucu külün özgül ağırlığı aynı zamanda puzolanik aktivitesini belirleyici bir faktör olan morfolojik özellikleri ile alakadardır. Küresel oldukları bilinen taneciklerin özgül ağırlığı tanecik çapına bağlı olarak çap küçüldükçe artmaktadır. Çapta bağımsız olarak içi boş camı küresel tanecikler uçucu külün özgül ağırlığını azaltıcı yönde etkilerler. Çoğu uçucu külün %60 ile %90' ı reaktifliği sağlayan bu camı öğelerdir. Bu camı öğelerin miktarı başlıca iki faktöre bağlıdır :

- 1) Termik santraldaki kömür yanma ünitesindeki sıcaklık
- 2) Yanma sonrası külün soğuma hızı

Yanma ünitesinin sıcaklığı ne kadar yüksek olursa ve yanma sonrası uçucu kül ne kadar çabuk soğursa küldeki camlaşmış fazın miktarı da o kadar fazla olacaktır.

Uçucu kül özgül ağırlığı ile puzolanik aktivite arasındaki ilişkiye incelik veya yüzey alanı gibi diğer bazı faktörler de dahil olmaktadır. Betonda puzolan olarak kullanılmaya namzet bir uçucu külün tane çapının %75' inin 45 mikronun altında olması istenir. Bir termik santralin kullanılan kömür kaynağında, kömür işleme, öğütme ve yakma tekniklerinde önemli değişiklikler olmadığı takdirde o termik santraldan elde edilen uçucu külün inceliği de hemen hemen sabit kalacaktır. İncelik

uçucu külün betondaki performansını etkileyen önemli bir faktördür. Kısacası incelik arttıkça uçucu külün betondaki performansı da artmaktadır.

### 2.2.3. Uçucu Küllü Betonları Oranlama Metodları

Çoğu uygulamada uçucu külün betonda kullanılması ile aşağıda verilen bir ya da daha fazla faydaya ulaşmak amaçlanır[1].

- Çimento miktarını azaltarak ekonomi sağlamak
- Hidratasyon ısını azaltmak
- İşlenebilirliği iyileştirmek
- 90 günün ötesinde betonda ihtiyaç duyulan mukavemet düzeyine ulaşmak.

Her uçucu kül sahip olduğu kendine has özellikleri ile kullanıldığı betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Karışım oranlama metodlarının ulaşmak istediği esas hedef, uçucu küller arasındaki bu farklılıkların betonun performansına olan etkilerini minimize etmektedir.

Uygulama uçucu kül betona iki yolla dahil edilebilir:

- Portland çimentosu yerine uçucu kül içeren bir çimento kullanılabilir.
- Uçucu kül betonu karıştırma esnasında ilave bir bileşen olarak kullanılabilir.

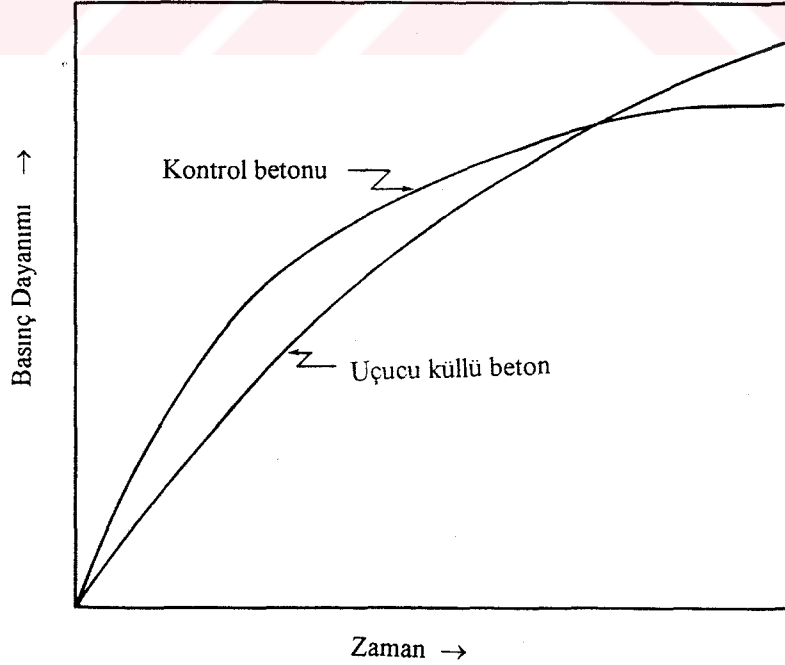
Birinci seçenek daha kontrollüdür. Homojenliğinden emin olunmayan ilave bir malzemenin meydana getirebileceği komplikasyonlardan uzaktır. İkinci yaklaşım ise daha esnektir ve uçucu külün betonun başlıca bir bileşeni olarak daha geniş bir çerçevede kullanılmasına müsaade eder. Buna karşın bu yaklaşım betonda kullanılacak uçucu külün gerekli bazı normlara uygun olmasını talep eder.

Uçucu kül betonda kullanılmaya başladığı andan itibaren bu karışımların bir referans beton ile kontrol edilmesi gerektiği düşüncesi hakim olmuştur. Böylece taze ve sertleşmiş durumdaki beton özellikleri referans betonunki ile kıyaslanmıştır. Bu sebeple uçucu küle diğer çimento, agrega, su gibi bileşenlerin fonksiyonlarını tamamlayan bir başka bileşen gibi değil de sadece çimentonun belirli bir miktarının yerine konulabilen bir katkı gözü ile bakılmıştır. Son zamanlarda ise uçucu kül beton teknolojisinde bu anlayışın üzerinde bir yer almaktadır. Karışımın bütünlüğü açısından uçucu küllü de betonun bir bileşeni olarak görme eğilimi zaman geçtikçe artmaktadır. Buna paralel olarak referans betona başvurma anlayışı da önemini yitirmektedir. Betonda uçucu kül kullanımı hakkında bu farklı bakış açılarından dolayı üç temel karışım oranlama metodu geliştirilmiştir.

- 1) Uçucu külün kısmi olarak çimentonun yerine konulması ( Basit İkame Metodu )
- 2) Uçucu külün ince agregâ olarak ilave edilmesi ( İlave Metodu )
- 3) Uçucu külün kısmi olarak çimento, ince agregâ ve su yerine koyulması
  - a) Modifiye edilmiş ikame metodu
  - b) Rasyonel oranlama metodu

### 2.2.3.1 Uçucu Külün Kısmi Olarak Çimento Yerine Konulması ( Basit İkame Metodu )

Basit ikame metodunda belirli bir oranda portland çimentosu yerine direkt olarak uçucu kül koyma esâsı geçerlidir. Bu metod ile yapılan bir çok çalışma, uçucu kül makul oranlarda (ağırlıkça ya da hacimce) portland çimentosu yerine konulduğu takdirde sulu ortamda 3 aylık bir süre zarfında basınç ve eğilme dayanımlarının azalmakta olduğunu, 6 ayın ötesinde ise daha yüksek dayanımlara erişildiğini göstermiştir[1]. Uçucu külün ilk kez ciddi olarak kullanıldığı kütle beton uygulamalarında hidratasyon ısı hızındaki arzulanan azalmanın sağlandığı gözönüne alındığında erken yaşlardaki dayanım düşüklüğü gibi istenmeyen yapısal sorunlar önemsiz mertebede kalmıştır. Basit ikame metodu kullanılarak yapılmış uçucu küllü bir betonda dayanım gelişiminin genel görünüşü şekil 2.1. de görülmektedir.



**Şekil 2.1** Basit İkame Metodu ile Oranlanmış Uçucu Küllü Betonda Dayanım Gelişiminin Genel Görünüşü

Bu görünüşün en basit açıklaması ise şudur: Erken yaşlarda uçucu kül çok az bağlayıcı nitelik göstermekte, daha çok ince agrega olarak davranmaktadır. İleriki yaşlarda ise bağlayıcılık aktivitesi bariz halde görülür ve nihai dayanıma yadsınamayacak bir katkısı olabilir. Bu noktada şuda bir gerçektir ki yüksek kireçli uçucu küller, düşük kireçli uçucu küllere nazaran oldukça farklı davranış gösterirler.

### **2.2.3.2 Uçucu Külün İnce Agrega Olarak İlave Edilmesi ( İlave Metodu )**

Bu metodun uygulanmasında karışımda kullanılacak çimento miktarında azaltma yapılmaksızın karışıma uçucu kül ilave edilir. Böylelikle betonun fiili bağlayıcı içeriği -özellikle uzun periyotlu kürden sonra- arttırılmış olmaktadır. Diğer karışım düzenlemeleri agrega miktarındaki değişikliklerle ve karışımın kullanılacağı uygulamanın özelliğine bağlı olarak yapılır. Bu metodun öngördüğü şekilde karışıma uçucu kül ilave edildiğinde betonun genel olarak her yaşta basınç dayanımının arttığı gözlenmiştir.

### **2.2.3.3 Uçucu Külün Kısmi Olarak Çimento, İnce Agrega ve Su Yerine Koyulması**

Geliştirilen üçüncü metoda göre uçucu küllü betonu oranlamak için çimentonun bir kısmının -ince agrega ve su miktarında ayarlama yapmak sureti ile- ağırlıkça daha fazla miktarda uçucu kül ile yer değiştirmesi gerekmektedir. Metod iki farklı forma sahiptir. Orjinal formunda 'modifiye edilmiş ikame metodu' olarak anılmakla birlikte uygulamadaki son gelişmeler bu metodun 'rasyonel oranlama metodu' olarak adlandırılması sonucunu getirmiştir.

#### **a) Modifiye Edilmiş İkame Metodu :**

Metodun 1958 yılında Lovewell ve Washa' nın çalışmaları ile ortaya çıktığı kabul edilmektedir. Bu çalışmalar karışım oranlarının değiştirilmesi ile erken yaşlarda uçucu küllü beton karışımların kontrol karışımları ile dayanım açısından karşılaştırılabilir hale gelebileceğini göstermiştir. Onların elde ettikleri sonuçların özü şu idi:

"Erken yaşlardaki ( 3. ve 28. günler arasında ) dayanım kayıplarını telafi edebilmek için uçucu kül ile yapılmış karışımlarda kullanılan toplam uçucu kül ve çimento ağırlığı karşılaştırılabilir dayanımdaki uçucu kül içermeyen karışımın çimento ağırlığından daha fazla olmak zorundadır."

1960 'lı yılların başlarında, eğer uçucu küllü betonun işlenebilirlik ve mukavemetinin bazı öngörülen koşullara uyması isteniyorsa sahip olduğu çoğu özellik ile bu parametrelere etki eden uçucu külün niteliklerinin karışım oranlama yapılırken her yönüyle ortaya konulması gerektiği anlaşılmıştır. Bu saptama Abrams' ın dayanım ve su/çimento oranı arasındaki ilişkisinden yola çıkarak ortaya atılan bir kaç karışım oranlama metodunun gelişimi esnasında meydana çıkmıştır [1].

### b) Rasyonel Oranlama Metodu

Uçucu küllü betonlar için rasyonel oranlama metodunun ilk kez Smith (1967) tarafından teklif edildiği kabul edilmektedir. Smith uçucu külün bağlayıcılık niteliğine göre değişen bir "etkinlik faktörü" (k) ileri sürerek karışımında kullanılması gereken çimento miktarı ve su/çimento oranı değerlerini elde etmek için geleneksel karışım oranlama prosedüründe değişiklik yapmıştır. Bu etkinlik faktörü her uçucu kül için farklılık göstermektedir. Faktör uçucu küllü beton karışımlarının performanslarından ya da başlangıç test programlarından tayin edilebilir [1,s 9].

Etkinlik faktörünü daha açık şekilde tanımlamak gerekirse; bir (F) uçucu kül ağırlığı (kF) kadarlık bir çimento ağırlığına karşılık gelmektedir. Bu takdirde uçucu küllü betondan istenen dayanım ve su/(toplam bağlayıcı malzeme) arasındaki ilişki;

$W / (C+kF)$  oranı ile ifade edilebilir.

Örneğin bir betondan istenilen dayanım 400 kg. çimento, 0.50 su/çimento oranı ile sağlanabiliyorsa bu karışım için

$W / Ç = 200 / 400$  olacaktır.

Eğer karışımında etkinlik faktörü  $k=0.3$  olan bir uçucu kül kullanılacağı düşünülürse ve buna bağlı olarak çimento miktarı 100 kg. azaltılırsa

$kF=100$  olacağından,

$F=333$  kg. uçucu külün kullanılması gerektiği görülmektedir.

Neticede,

$W/(C+kF) = 200/(300+333 \times 0.3)$  oranı elde edilmektedir [7].

Bu metod İngiltere 'de uygulanmış ve oranlama prosedürlerini basitleştirmek için bir takım tablolar hazırlanmıştır. Buna karşın Munday (1983) ise bu metodun uygulamadaki bazı bariz zayıflıklarına dikkat çekmiştir [1,s 9]:

1) k değeri aynı kaynaklı bir uçucu kül için bile sabit değildir. Bu değer kullanılan çimentoya, kür koşullarına ve oranlaması yapılan betonun öngörülen dayanımına bağlı olarak değişir.

2) İstenilen işlenebilirliğe ulaşabilmek için, beton için gerekli su miktarı kullanılan uçucu küle göre değişecektir. Bir kül su ihtiyacını arttırmayabilirken bir diğeri artırabilmektedir. Bu değişkenlik agrega miktarı uygun şekilde ayarlanarak dengelenebilir ancak bu pek pratik bir yaklaşım olmamaktadır. Uygulamada genelde su miktarı ile ayarlama yapıldığından hedef dayanımda sapmalar da yüksek olmaktadır.

3) Metod çoğu amaç için komplekstir ve belkide pratik olarak uygulanabilir değildir denilebilir.

1968 yılında Kuzey Amerika 'daki bazı uygulamalarda tatbik etmek üzere birkaç araştırmacı yazar tarafından Abrams 'ın ilişkisine dayanarak uçucu küllü betonlar için oranlama metodları geliştirme teklifi yapılmıştır. Cannon, Tenesse Valley Authority tarafından yürütülmüş "28. ve 90. günlerde kontrol karışımlarına eşit dayanımlar elde etmek için uçucu küllü beton karışımlarını oranlama metodları" konulu araştırmayı rapor halinde yayınlamıştır [1]. Cannon su/çimento oranı ve dayanım arasında Abrams 'ın ilişkisini kullanmış ve uçucu kül ile portland çimentosunun birbiri ile mukayeselerini göz önüne alan bir faktör ortaya koymuştur. Bu yaklaşımın kapsamlı laboratuvar araştırmaları ve saha deneyimleri ile birleştirilmesi Cannon' a oranlama prosedürlerini kolaylaştırıcı tablolar ve grafikler geliştirme imkanı tanımıştır.

Lovewell ve Washa 'nın da (1958) daha önce savunduğu gibi, Cannon' un yaklaşımından portland çimentosu ve uçucu külün toplam ağırlığını karşılaştırılabilir bir kontrol karışımında kullanılan çimento ağırlığından daha fazla olması gerektiği sonucuna varıldı [1,s 10].

1975 yılında Ghosh, Lovewell ile Washa ve Cannon' un çalışmalarından yola çıkıp daha ileri, kapsamlı yaklaşımlar geliştirerek uçucu küllü beton karışım oranlamayı önemli ölçüde kolaylaştıran bir seri amprik ilişki yayınlandı. Ghosh, Abrams' ın "iyice sıkıştırılmış bir betonun dayanımı ile su/çimento oranı ters orantılıdır" ilişkisini kullanmış, bunu yaparken su/çimento oranını uçucu külü de içine alarak genişletmiş neticede uçucu küllü ve kontrol betonlarının dayanımlarını aşağıdaki şekilde eşitlemiştir [1,s 10]:

$$R' = M + NR$$

(2.1)

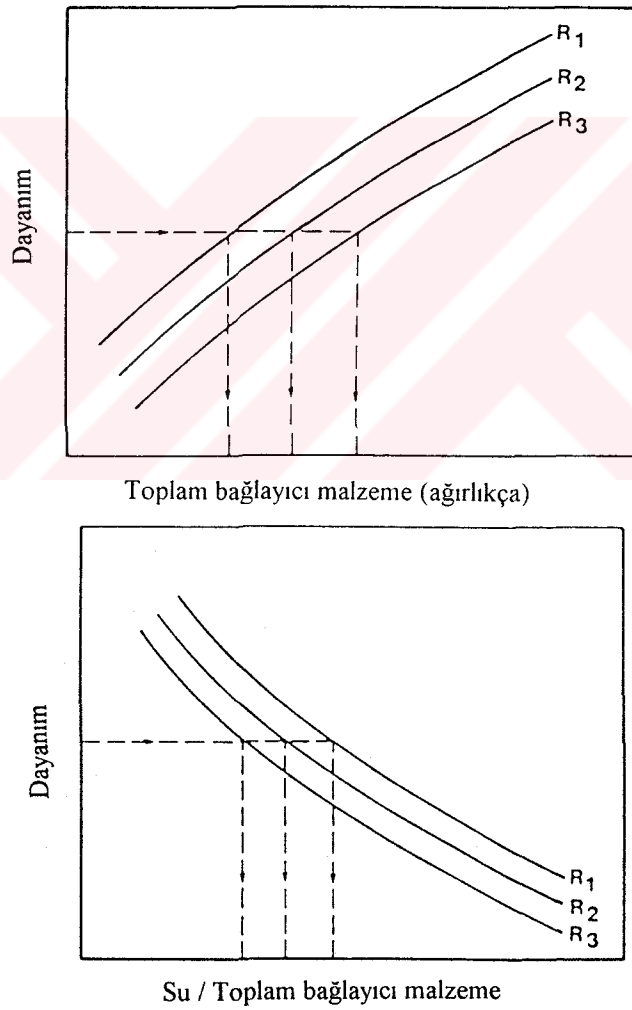
Burada:

$R$  = Kontrol betonu su/çimento oranı,

$R'$  = Uçucu küllü betonun su/(çimento+uçucu kül) oranı,

$M$  ve  $N$  sabitlerdir.

Sonuçta Ghosh, laboratuvarında elde edilen kapsamlı deney sonuçları ile belirli yaşlarda farklı (uçucu kül/çimento) oranları için  $M$  ve  $N$  ampirik sabitlerini hesaplayarak tablo ve grafikler vasıtası ile karışım oranlarının seçilebileceği bir prosedür geliştirmiştir (Şekil 2.2).



**Şekil 2.2** Farklı Bağlayıcı Malzeme Harmanları için Herhangi bir Yaştaki Dayanım İlişkileri  
( $R$  = İkincil bağlayıcı malzeme/Portland çimentosu oranı)

1981 yılında Amerikan Beton Enstitüsü "Normal, ağır ve kütle betonların karışım oranlarının seçimi için standart uygulama" (ACI 211.1-81) adı altında puzolanlı beton karışımların oranlanmasını da kapsayan kılavuzu revize edilmiş olarak yayınlamıştır. Yayımlanan bu çalışmada ağırlıkça eşit miktarda malzeme kullanma ve mutlak hacimce eşit bağlayıcı malzeme kullanma şeklinde iki ayrı yaklaşım ele alındı. Bu yaklaşımlardan hangisi kullanılırsa kullanılsın sonuçta elde edilen karışım fiilen basit ikame metodu ile oranlanmış olmaktadır [1].

1982 yılında Kanada 'da ilave bağlayıcı malzemeler ve beton uygulamalarında kullanımları ile ilgili bir milli standart yayınlanmıştır (CAN 3-A23.5-M82). Standart uçucu külün betonda kullanımına ilaveten aynı zamanda uçucu küllü beton karışımlarını oranlamak için bir de kılavuz sunmuştur. Bu çalışmada benimsenen yaklaşım da Ghosh tarafından geliştirilmiş olan metoda dayandırılmış idi [1].

İngiltere 'de Munday ve arkadaşları (1983), 28. günde (ya da arzulanan daha erken yaşlarda) hedeflenen herhangi bir mukavemeti elde etmek üzere uçucu küllü beton karışımları oranlamak için bir prosedür teklif ettiler. Bu metodla karışım hesaplarını belirlerken, kullanılacak uçucu kül kaynağı için geçerli aşağıda birbirini takip eden ve altı adımda sıralanan dataların toplanması gereklidir [1,s 12]:

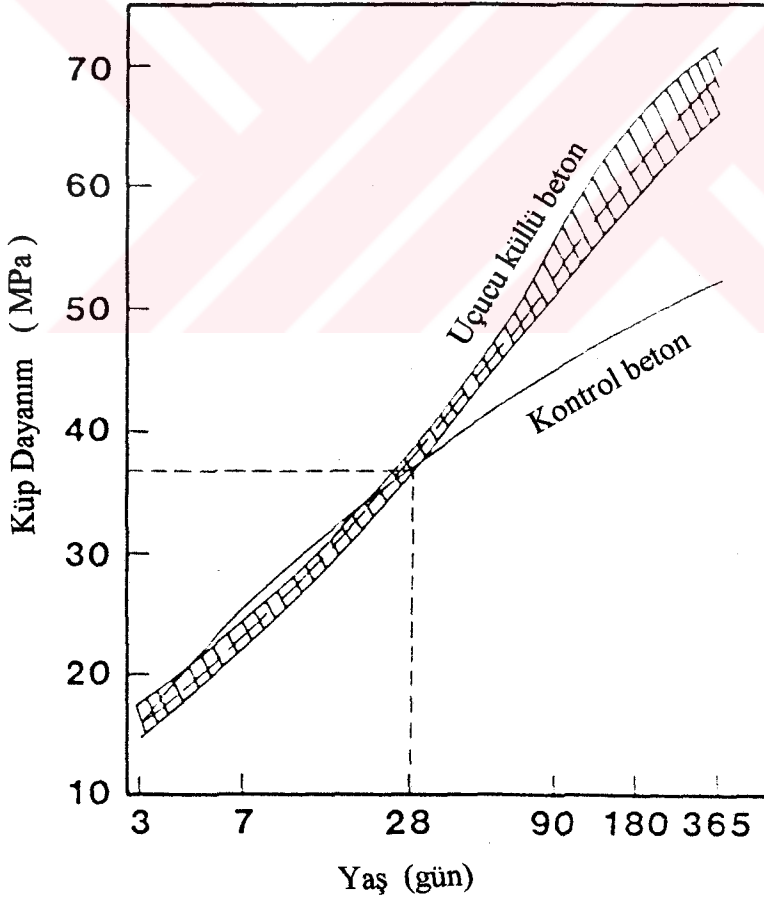
- Su/çimento oranının belirlenmesi
- Serbest su miktarının seçilmesi
- Uçucu kül/çimento oranının belirlenmesi
- Çimento ve uçucu kül miktarının belirlenmesi
- Total agrega miktarının belirlenmesi
- Deneme karışımlarının yapılarak incelenmesi

Standart metodlarla hazırlanmış bir portland çimentosu betonu karışım oranları ve bu betona karşılık olarak yukarıda teklif edilen metod ile oranlanmış uçucu küllü betonların karışım oranları ile ilgili bir örnek Tablo 2.6 da verilmiştir.

Son zamanlarda ortaya atılan karışım oranlama metodları, uçucu küllü betonları istenen herhangi bir yaştaki dayanımlarının karşılaştırılabilir beton mukavemetinin daha da üstünde olacak şekilde oranlamanın mümkün olduğunu ispat etmek üzerinde yoğunlaşmıştır (Şekil 2.3). Bununla birlikte bu yaklaşımlar uygulamada kullanıldığında bir kaç faktörün göz önüne alınması gerekir. Normal bir karışım oranlama prosedüründe olduğu gibi deneme karışımları yapılmalı ve beton bileşimleri düzenlenmelidir. Buna ilaveten her uçucu kül farklı özelliğe sahip olduğundan deneme karışımının sağlıklı bir şekilde oranlanabilmesi için kullanılan uçucu kül hakkında edinilen bilgilerden muhakkak yararlanılmalıdır. Uçucu kül ile yapılmış betonlar kür boyunca sıcaklık ve nem koşullarına sıradan bir betondan daha

**Tablo 2.6.** 28. Günde Eşit Dayanım Elde Etmek Üzere Oranlanmış Şahit ve Uçucu Küllü Betonlar için Örnek Karışım Oranları [1]

|                | Uçucu kül |                     |          | Karışım Oranları ( kg/ m <sup>3</sup> ) |        |     |        |
|----------------|-----------|---------------------|----------|-----------------------------------------|--------|-----|--------|
|                | Kaynak    | 45 $\mu$ m üstü (%) | K.K. (%) | Çimento                                 | U. Kül | Su  | Agrega |
| Şahit Beton    | —         | —                   | —        | 310                                     | —      | 190 | 1890   |
| U. Küllü Beton | A         | 11.7                | 2.3      | 223                                     | 149    | 166 | 1838   |
|                | B         | 22.7                | 4.1      | 249                                     | 159    | 182 | 1740   |
|                | C         | 45.7                | 7.4      | 298                                     | 156    | 200 | 1666   |
|                | F         | 25.6                | 9.5      | 296                                     | 177    | 210 | 1612   |
|                | G         | 29.7                | 5.1      | 246                                     | 163    | 184 | 1752   |
|                | H         | 3.3                 | 2.4      | 215                                     | 144    | 161 | 1875   |



**Şekil 2.3.** Şahit ve Uçucu Küllü Beton için Dayanım - Yaş İlişkisi

hassas olduğundan herhangi bir konstrüksiyonun beton karışımını oranlamak için deneme karışımlarından elde edilen datalar kullanılırken bu faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır.

#### **2.2.4 Uçucu Külün Taze Beton Özelliklerine Etkisi**

Taze beton çimento hamuru içinde dağılmış agrega ve diğer katı taneciklerden ibarettir. Karışım aynı zamanda doğal olarak az oranda hava içerir. Bu çok fazlı kompozit sistem statik değildir. Çimento ile su birbiriyle karışır karışmaz beton kütleli birleştiren bağların meydana geldiği reaksiyonlar başlar. Yeni tanecikler biçimlenir, başlangıçtaki tanecikler çözülür ya da çimentonun reaksiyon ürünleri tarafından çevrelenirler. Dağıtma, flokülleşme ve yerçekimi kuvvetleri bu dinamik sistemin uzaysal kompozisyonunu tanzim etmek için yarışa girerler. Meydana gelen kimyasal reaksiyonlar boyunca ısı açığa çıkar ve sıcaklık yükselir. Tüm bu olaylarda uçucu kül de bir miktar rol oynar. Düşük kireçli uçucu kül büyük ölçüde küresel biçimli ince bir agrega olarak davranmakta iken yüksek kireçli uçucu külün ilk çimento reaksiyonlarında bir miktar fonksiyonu olabilmektedir.

Betonun karıştırıldıktan sonra yerine yerleştirilebilmesi için belirli bir işlenebilirlik düzeyinin sağlanması şarttır. Bu düzey sahip olduğu bütün bileşenlerinden etkilenen sistemin reolojik özellikleri ile belirlenir. Bundan dolayı uçucu külün özelliklerinden optimum şekilde yararlanabilmek için uçucu külün taze beton reolojisindeki rolünü iyi anlamak gerekir.

##### **2.2.4.1 Uçucu Külün Betonun Priz Süreleri Üzerindeki Etkisi**

Betonun karıştırıldıktan sonraki ilk bir kaç saat boyunca priz aldığı aşamaların ilki priz başlangıç zamanı, sonuncusu ise priz bitiş zamanı olarak tanımlanır ve bu süreler bazı penetrometre testleri ile tayin edilir.

Uçucu kül bir yada birkaç sebepten ötürü çimentonun sertleşme hızını etkileyebilir :

- Külün kendisi bağlayıcı olabilir (Yüksek kireçli).
- Uçucu kül portland çimentosuna ilave edilen jips ile aynı yönde etki gösteren sülfat içerebilir.
- Uçucu kül-çimento harçları uçucu kül varlığının bir sonucu olarak daha az suya ihtiyaç duyabilirler. Bu durumda doğal olarak sertleşme hızını etkileyecektir.
- Uçucu kül taze beton reolojisini değiştirmek için ilave edilen aktif maddeleri

(su azaltıcılar) emebilir, neticede yine harç fazının sertleşmesini etkilemiş olur.

- Uçucu kül tanecikleri çimento hidratasyon ürünlerinin kristalizasyonu için çekirdek rol oynayabilir.

Ancak genelde tüm mineral maddelerin betonun priz sürelerini geciktirdiği görülmektedir [14]. Literatürde düşük kireçli uçucu küllerin çimentonun priz süresine bir derece geciktirici etkisi olduğuna dair bir kanaat hakimdir.

Lane ve Best de (1982) uçucu külün genel olarak betonun prizini yavaşlattığı sonucuna varmışlardır. Gözlenen bu gecikme üzerinde karışım oranlama yönteminin, uçucu külün inceliği ve kimyasal kompozisyonunun etkili olabileceğini fakat çimento inceliği, hamurun su içeriği ve ortam sıcaklığının gecikmeyi çok daha fazla etkilediğini iddia etmişlerdir [1,s 18].

Davis ve arkadaşları (1937) çimentolu karışımların yerini tutan uçucu kül-çimento karışımlarının daha yavaş priz aldığını fakat priz zamanlarının olağan, belirlenmiş limitlerin dışında kalmadığı sonucuna vardılar [1,s 18].

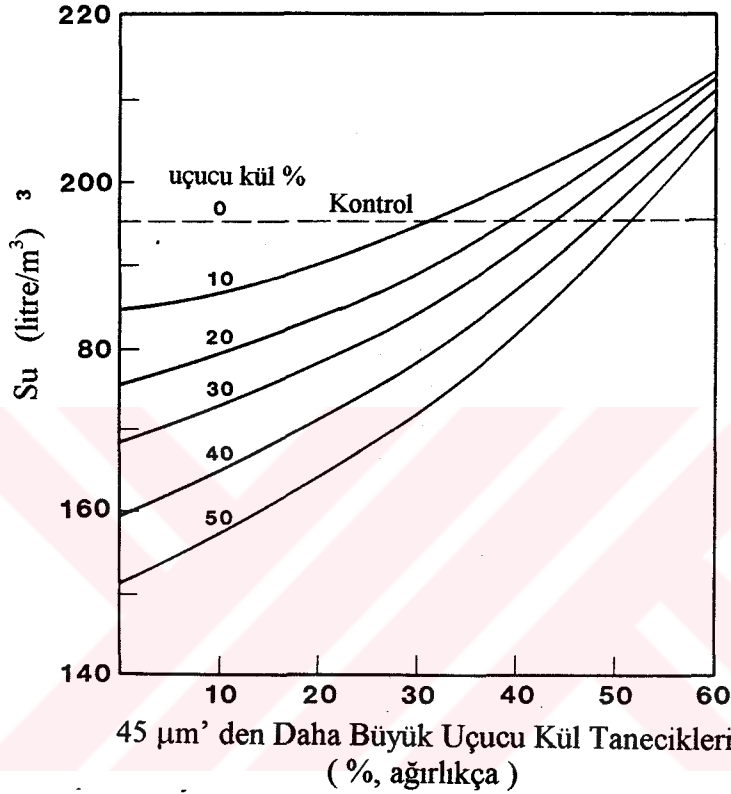
Mailvaganam ve arkadaşları (1983) farklı iki sıcaklıkta düşük kalsiyumlu bir uçucu kül ile yapılmış karışımların taze ve sertleşmiş beton özelliklerini incelemişlerdir. 5° C de karıştırılmış betonlarda uçucu kül içeriğinden bağımsız olarak priz zamanında 10 saati geçen gecikmeler gözlenmiş, 20 °C de karıştırılmış ve %30 uçucu kül içeren (çimentonun ağırlığınca) betonlarda ise gecikme süresinin 1 ila 1.75 saate kadar azaldığı saptanmıştır [1,s 18].

Kashima ve arkadaşları su altı betonu üretiminde yüksek oranda uçucu kül kullanımının prizi aşırı geciktirmediğini belirtmişlerdir. Rodway ve arkadaşları yüksek oranda C tipi uçucu kül ile 0.33 su/çimento oranında 22.5 cm çökme veren betonda priz sürelerinin normal olduğunu gözlemişlerdir [14].

#### **2.2.4.2 Uçucu Külün Taze Betonun İşlenebilirliği, Su İhtiyacı ve Terlemesi Üzerindeki Etkileri**

Küçük tane çaplı ve küresel forma sahip düşük kireçli uçucu kül içeren bir hamurun uçucu kül kullanılmamış karşılaştırılabilir hamurdan beklenen aynı işlenebilirlik düzeyine daha az miktarda su ile ulaşabileceğine inanılmaktadır. Bu açıdan Davis ve arkadaşlarının ileri sürdüğü gibi uçucu kül genel olarak beton karışımının su ihtiyacını artıran diğer puzolanlardan farklılık göstermektedir. Bilhassa düşük dozajlı karışımların ve yeterince ince taneli malzemeden yoksun agregalar ile yapılmış betonların reolojisinde uçucu külün değeri daha fazla anlaşılmaktadır.

Owens 'a göre (1979) uçucu külün betonun işlenebilirliği üzerinde etkili olduğu ana faktör külün içindeki iri materyal ( $> 45 \mu\text{m}$ ) oranıdır. Owens değişik ikame oranlarında farklı tane çapı dağılımlarına sahip (  $45 \mu\text{m}$  mikrondan daha iri taneciklerin yüzdesi olarak ) uçucu külün kontrol betonuna göre ve kendi içinde su ihtiyacını nasıl etkilediğini incelemiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar Şekil 2.4 'deki gibi yorumlanmıştır [1,s 22].



**Şekil 2.4** Uçucu Külün İri Partikül İçeriğinin Betonda Eşit İşlenebilirlik için Gerekli Su Miktarı Üzerindeki Etkisi

Pasko ve Larson (1962) beton karışımlarda 63 mm çökmeyi muhafaza edecek şekilde uçucu külün çimento ile kısmi yer değiştirmesi ile değişen su ihtiyacını incelediler. %20 çimento yerine %30 oranında uçucu kül koyulan bir karışımın su ihtiyacında %7.2'lik bir azalma saptadılar [1,s 23].

Price (1961) South Saskatchewan River baraj inşaatında kullanılacak beton malzemelerin araştırılmasında uçucu külü de test etmiş, sabit çimento içerikli olarak oranlanmış betonların yapımında uçucu kül kullanıldığında su ihtiyacının artmadığını görmüştür. Neticede elde edilen betonların işlenebilirliği ve kohezyonu iyileşmiş, aynı zamanda suyun toplam bağlayıcı malzemeye olan oranı daha azalmıştır [1,s 23].

Brown (1982) çimento ile eşit hacimde yer değiştirmeyi esas alarak uçucu kül ikame edilmiş farklı su/çimento oranlarındaki 4 betonun işlenebilirliğini incelemiştir.

Her karışım için çökme, V-B süresi ve sıkıştırma faktörü değerleri ölçülmüştür. İkame oranlarının artırılmasına paralel olarak çökme ve V-B işlenebilirliklerinin her ikisinin de arttığı gözlenmiştir. Neticede söz konusu değişimlerin uçucu kül yerdeğiştirme miktarına (küçük ikame oranları bazen etkisiz olmaktadır) ve karışımın su içeriğine bağlı olduğu bulunmuştur.

Brown üzerinde çalıştığı diğer deney serilerinde, betonda diğer tüm karışım oranlarını sabit tutarak agrega veya kum yerine eşit hacimde uçucu kül ikame edilmesinin etkisini araştırmıştır. Test betonları ya kum hacminin ya da toplam agrega hacminin %10, 20, 40 oranlarında uçucu kül ile yerdeğiştirilmesi ile üretildiler. Uçucu kül, kum hacmi ile olsun, toplam agrega hacmi ile olsun en fazla %8 ikame oranında işlenebilirlikte bir artış göstermiştir. Bunun ötesindeki ikame oranları işlenebilirlikte hızlı azalmalara sebep olmuştur. Toplam agrega hacminin %40 'ı ile yerdeğiştirme işlenemez bir karışım ortaya çıkarmıştır [1,s 23].

Brink ve Halstead (1956) , yaptıkları çalışmada test harçlarında kullandıkları bazı uçucu küllerin su ihtiyacını azalttığını, bazılarının ise (daha yüksek karbon içeren) su ihtiyacında kontrol harçlarının üzerinde bir artış gösterdiklerini gözlemişlerdir [1,s 24].

Welsh ve Burton (1958), bazı Avusturalya küllerinin basit ikame metodu ile su miktarı sabit tutularak yapılan betonlarda kullanılması ile karışımda çökme ve akış kaybının gözlemlendiğini belirtmişlerdir [1,s 24].

Rehsi (1973), birkaç Hindistan uçucu külü ile yaptığı deneylerde incelenen tüm küllerin betonun su ihtiyacını artırdığını saptamıştır [1,s 24].

Bu istenmeyen su ihtiyacını artırıcı özelliğin genelde karbon miktarı ve iri tane miktarı fazla olan eski güç santrallerinden elde edilmiş uçucu küller için söz konusu olduğu da kabul edilmiş bir gerçektir. Yakın geçmişte CANMET (1984) tarafından yapılmış bir çalışma kabul edilebilir özelliklere sahip modern güç santrallerinden elde edilmiş bir uçucu külün bile karışıma katılmasının her zaman su ihtiyacını azaltmayacağını göstermiştir.

Uçucu küllü betonların oranlanmasında işlenebilirliğin önemli bir faktör olması sebebi ile son yıllarda uçucu küllü beton reolojisinin teorik izahını geliştirmek için bir hayli emek sarf edilmektedir. Bir karışımda çimento, su, uçucu kül ve ince kum tanecikleri hamur formunu alıp, agrega tanecikleri arasındaki boşlukları doldurarak ve

bu tanecikleri sararak akışkan kütleye kohezyon ve plastisite sağlarlar. Tattersall (1976) taze betonun reolojik davranışına (pratikte önemli olan düşük deformasyon hızlarında) Bingham\* modelinden yaklaşarak bu davranışı şöyle tanımladı .

$$\tau - \tau_0 = \mu_p \times \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Burada :

$\tau$  = Kayma gerilmesi

$\dot{\gamma}$  = Deformasyon hızı

$\tau_0$  = Akma sınırı

$\mu_p$  = Plastik viskozite katsayısı

Tattersall ve onun çalışmalarını takip eden diğer araştırmacılar betonun reolojisini Bingham modeline dayalı olarak araştırmak maksadıyla bir cihaz geliştirdiler. Bu cihazla taze betona batırılmış bir iticinin torsiyonu (T) ve dönme hızı (N) ölçülür. T ile N arasındaki ilişki aşağıdaki şekli alır :

$$T = g + hN \quad (2.3)$$

İlişki bu haliyle Bingham ifadesine tamamıyla uyar; g ve h sırasıyla akma sınırına ve plastik viskoziteye karşılık gelir. Tek noktada saptama yapan diğer standart testlerle karşılaştırıldığında özellikler minimum iki deformasyon hızında tespit edildiğinden bu test iki nokta testi (two-point test) olarak adlandırılmıştır.

Testin uçucu küllü betona uygulanmasını ve bu teknik ile şimdiye kadar elde edilen verilerin önemini anlayabilmek için bu test koşulları altında gözlenmiş betonların davranışlarından elde edilen bazı ön saptamalarla hareket etmek gerekmektedir :

- Su/çimento oranı artarken g ve h değerlerinin her ikisi de azalmaktadır.

\*Bingham Akış Modeli Newton kanununa uymayan bir akım için kayma gerilmesi ( $\tau$ ) ve deformasyon hızı ( $\dot{\gamma}$ ) arasındaki ilişkiyi tarif eder. Akım olabilmesi için belirli bir düzeyde kayma gerilmesi uygulanmalı yani kayma gerilmesi akma sınırından büyük değer almalıdır. Bir kez akma gerilmesi aşıldığında bunun ötesindeki kayma gerilmesi Newton davranışına neden olur ve kayma şekil değiştirmesi kayma gerilmesine orantılı olur.

- İnce malzeme miktarı artarken g değeri de artmaktadır ve bu artış oranı daha zengin karışımlar (ya da daha düşük su/çimento oranlı) için daha büyüktür.
- İnce malzeme miktarının (h) üzerindeki etkisi daha komplekstir. Zengin karışımlar için h değeri su/çimento ve agrega/çimento oranlarına bağlı olarak bir minimumdan geçer.
- Su azaltıcı katkı ilave etmek akma sınırını azaltır, h üzerinde karasız bir etki yapar.
- Süper akışkanlaştırıcılar g değerini önemli ölçüde azaltır ancak h üzerinde çok az etki gösterirler.
- Hava sürüklenme g ve h değerlerinin ikisini de azaltır.

İşlenebilirliği ölçmek için kullanılan iki nokta yöntemi ve çökme testi arasındaki ilişkiye dair şu yorum yapılabilir; çökme sıfır deformasyon hızında ölçüldüğünde etkili sonuç verir. Bu sebeple akma sınırı ile (g) zıt bir ilişkiye sahip olduğu görülür. g değerinin azaldığının görüldüğü hallerde çökmede bir artış beklenebilir ve pratikte işlenebilirlikte bir artış olarak yorumlanabilir. Tersine ile izah etmek gerekirse, çökme ile tayin edilen işlenebilirliğin arttığı durumlarda akma sınırında bir düşüş beklenebilir.

Konuya ışık tutmak üzere yapılan çalışmalardan çeşitli verilere ulaşılmıştır. Hobbs akma sınırı ve plastik viskozite ile betonun volumetrik parametreleri arasında ilişki kuran matematiksel tanımlamalar geliştirmiş ve bu tanımlamaların Ivanhov ve Zacharieva'nın uçucu kül-çimento hamurundan elde ettiği viskozite verileri ile ve Brown tarafından Basit İkame Metodu ile üretilen betonlar üzerinde yapılmış işlenebilirlik ölçümleri ile paralel olduğunu göstermiştir. Hobbs'un teorisi uçucu kül ile agreganın yer değiştirdiği betonlarda uçucu kül hacmi minimal bir eşiğe kadar arttığında akma sınırının ve plastik viskozitenin azaldığını, bu eşiğin ötesindeki hacimsel yer değiştirmelerde ise arttığını var saymaktadır.

Ivanhov ve Zacharieva (1982), uçucu külle üretilmiş betonlarda vibro-vizkometreler kullanarak benzer sonuçlara ulaşmışlardır. Onlar da taze betona Bingham modeli ile yaklaşılabileceğini saptamışlar ve buna bağlı olarak 3 sonucu ileri sürmüşlerdir :

- Akma sınırı ve plastik viskozitenin her ikisinin de su/çimento oranı ile tersine bir ilişkiye sahip olduğu, Bu ilişkinin derecesinde uçucu külün yüzey alanına bağlı olduğu bulunmuştur.
- İnce külün işlenebilirliği iyileştirmede iri küle nazaran daha etkili olduğu bulunmuştur.

- Plastik vizkozitenin sabit bir (uçucu kül)/(toplam bağlayıcı malzeme) oranında, hamur hacmindeki bir artış ile birlikte arttığı bulunmuştur.

Neticede, akma sınırı ve plastik viskoziteyi tayin ederek ve beton reolojisini anlayarak teorik bir temel geliştirme maksadıyla yapılmış bu ön çalışmalar uçucu külün betonu akışkanlaştıran bir davranış gösterdiğine işaret etmektedirler [1,s 30].

Okada ve arkadaşları kendi kendine yerleşebilen su altı betonunda yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmasını araştırmışlar ve üretilen betonlarda uçucu kül ve cürufun artışıyla akıcılığın arttığını gözlemişlerdir. Carles-Gibergues ve Husson desülfürizasyon işlemi sonucu uçucu külün özgül yüzeyinin arttığını ve sabit işlenebilme için daha fazla su gerektiğini gözlemişlerdir [14].

Copeland (1982), normal haliyle terlemeye eğilimli olan kaba karışumlu betonlarda uçucu kül kullanımının terlemeyi azalttığını ileri sürmüştür[1,s 30].

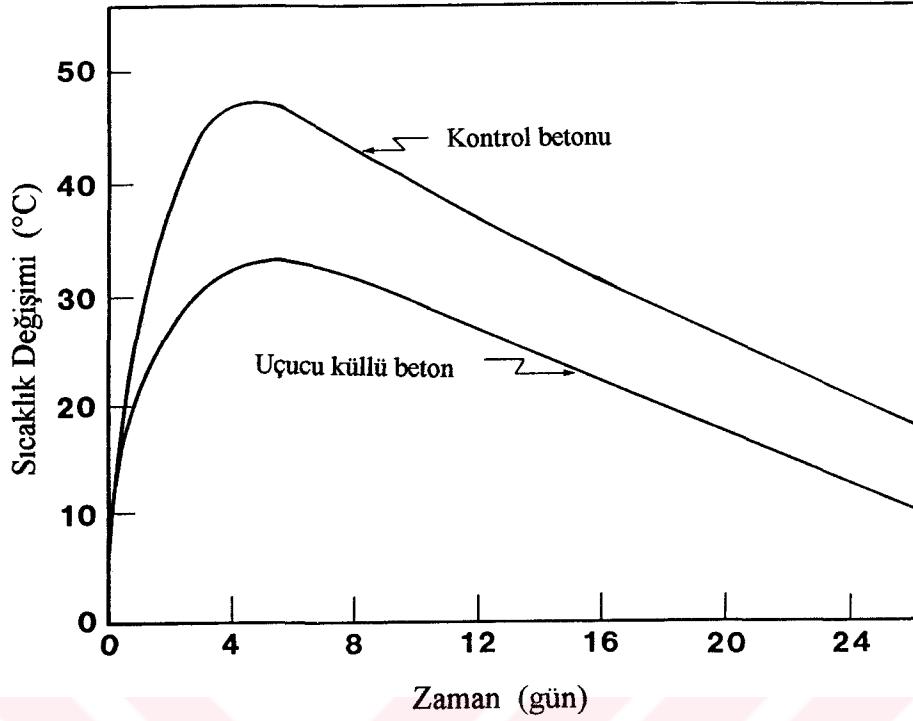
Johnson (1981), Cape Town 'da yapılan çoğu betonda bölgesel olarak mevcut kum kaynaklarında yeterince ince malzeme olmamasına bağlı olarak aşırı terleme problemlerinin yaşandığını saptamış, bu betonlarda uçucu kül kullanarak toplam hamur hacminin artırılması ile terleme probleminin üstesinden gelinebileceğini belirtmiştir [1,s 30].

CANMET 'in yaptığı çalışmada (1984) 11 uçucu kül incelenmiş, ikisi hariç tamamının betonun terlemesini artırdığı gözlenmiştir[1,s 30].

#### **2.2.4.3 Uçucu Külün Hidratasyon Isısı ve Sıcaklık Yükselmesi Üzerindeki Etkisi**

Katılaşmanın ve sertleşmenin kimyasal nedeni olan hidratasyon, çimentolarda ekzotermik (ısı çıkaran) bir reaksiyon şeklinde gelişir [8]. Çimento ile suyun karışması ile başlayan bu ısı gelişimi doğal olarak beton kütlenin sıcaklığını da artırır. Karışıma giren çimento miktarının uçucu kül ikamesi ile azaltılması taze betonda yükselen sıcaklığı düşürmektedir. Bu olumlu etki özellikle büyük kütle betonları için çok önemlidir. Zaten uçucu kül esaslı olarak ilk kez bir ağırlık barajı inşaatında betonun sıcaklık artışını kontrol etmek maksadı ile kullanılmıştır.

Compton ve MacInnis (1952) , %30 ikame oranında bir Doğu Kanada uçucu külü kullanılarak yapılmış beton ile kontrol betonunun sıcaklık yükselmelerini karşılaştırarak elde ettikleri verileri Şekil 2.5 de gösterilen sıcaklık-zaman eğrileri ile açıklamışlardır [1,s 31].



Şekil 2.5 Test Edilen Uçucu Küllü ve Normal Betonlar için Sıcaklık Artış Eğrileri

Bamforth (1980) , çimentoya ilave olarak uçucu kül ya da yüksek fırın cürufu içeren kütle betonları hakkında kapsamlı bir rapor hazırlamıştır. Bu araştırmaya üç büyük temel elemanındaki sıcaklık artışının ve bunun neticesindeki deformasyonların incelenmesi de dahil edilmiştir. Üç çeşit beton yapılması öngörülmüştür :

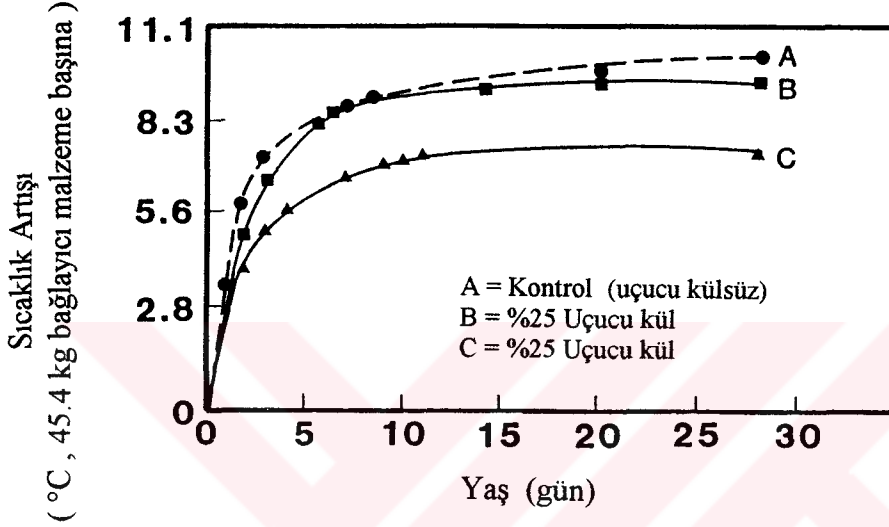
- 400 kg/m<sup>3</sup> Portland çimentosu içeren bir kontrol karışımı
- Portland çimentosunun %75 'i yerine yüksek fırın cürufunun kullanıldığı bir karışım
- Portland çimentosunun %30 'u yerine bir taş kömürü uçucu külünün kullanıldığı bir karışım

Betonlar derinliği 4,5 m , hacimleri 144 ila 212 m<sup>3</sup> arasında değişen 3 temel elemanına yerleştirildi. Temel elemanları yerleştirilen betonlarda ısı açığa çıkan devrenin erken safhaları boyunca sıcaklık değişimlerini ve hareketini ölçmek için uygun şekilde techiz edildi.

Çimento yerine fazla miktarda uçucu kül ya da cüruf ikame edildiği takdirde sıcaklık artış nispeti de buna bağlı olarak azalmış, beton kütlede oluşan maksimum sıcaklık düşmüştür. Çimento yerine konulan tüm düşük kireçli uçucu küllerin sıcaklık

artışı nispetini azaltacağını öne sürmek makul bir yaklaşımdır. Bazı yüksek kireçli uçucu küller için durum böyle değildir. Bazı yüksek kireçli uçucu küller su ile çok hızlı şekilde reaksiyona girdiklerinden ortaya çıkan ısı fazla olmaktadır [1,s 34].

Crow ve Dunstan (1981) beton karışımlarda adiabatik sıcaklık artışları arasında ilişki kuran bir çalışma yaptılar. Şekil 2.6 da da görüldüğü gibi %25 ikame oranında düşük kireçli uçucu kül içeren betonun ısı açığa çıkarma nispeti azalmıştır. %25 ikame oranında yüksek kireçli uçucu kül içeren beton ise Portland çimentolu kontrol betonu kadar ( benzer nispette ) ısı meydana getirmiştir [1,s 37].



Şekil 2.6 Yüksek Kireçli Uçucu Kül Kullanarak Yapılmış Betonda Adiabatik Sıcaklık Artışı

#### 2.2.4.4 Uçucu Külün Taze Betonda Hava Sürüklenme Üzerindeki Etkileri

Donma çözülme tekrarlarında betonun zarar görmesi boşluklarına girecek suyun donması ve donmadaki hacim genişlemesi ile ilgilidir (8). Eğer beton belirli bir olgunluk seviyesine dek gerektiği şekilde saklanmış, dona dayanıklı iri agrega ile yapılmış ise ve buna ilaveten betona uygun şekilde hava sürüklenmişse bu betonun dona karşı dirençli olması tabiidir. Sertleşmiş betonun dona dayanıklılığı açısından gerekli olan arzulanan ölçüde hava boşluğu elde etmek için karıştırma anında betona belirli bir dozajda hava sürükleyici katkı ilave edilir. Bu tür katkılarda aranan önemli iki nitelik vardır. Hava sürükleyici katkı betonda istenilen hacimde ve boyutta hava kabarcıkları meydana getirmeli, buna ilaveten beton karıştırılırken, taşınırken ve yerleştirilirken hava içeriğinin sabit kalmasını, kararlı dağılmasını temin edecek vasıfta olmalıdır.

Bu konuda yapılan bir çok çalışmada uçucu külün betonun hava içeriğini düzenlemek için katılan hava sürükleyici katkı miktarını artırdığı sonucuna varılmıştır.

Larson (1953) hava sürüklenmiş betonlarda uçucu kül kullanımı üzerine sunduğu çalışmadan ve diğer araştırmacıların çalışmalarından uçucu külün asıl etkisinin hava sürüklenme üzerine değil, hava sürükleyici katkı ihtiyacı üzerine olduğu sonucuna varmıştır [1,s 38].

Gebler ve Klieger (1983) 10 farklı uçucu külü inceledikten sonra taze betonda hava sürüklenme ile ilgili şu sonuçlara vardılar [1,s 39]:

- Genel olarak C sınıfı uçucu kül içeren betonlar F sınıfı uçucu kül içeren betonlardan daha az hava sürükleyici katkıya ihtiyaç duymaktadırlar.
- C sınıfı uçucu kül içeren plastik kıvamlı betonlar F sınıfı uçucu kül içeren betonlara nazaran hava kaybetmeye daha az meyillidirler.
- F sınıfı uçucu kül içeren plastik kıvamlı betonlardaki hava içeriği karıştırma tamamlandıktan sonra %59 nispetinde azalmıştır.
- Uçucu külde organik madde miktarı, karbon içeriği ve kızdırma kaybı artarken hava sürükleyici katkı ihtiyacı da artmaktadır.
- Genel olarak, uçucu külde toplam alkali miktarı artarken hava sürükleyici katkı ihtiyacı azalmaktadır.
- Bir uçucu külün özgül ağırlığı artarken , betonda hapsolan hava da artmaktadır. Yüksek oranda kireç içeren (C sınıfı) ve çok az miktarda organik maddeye sahip uçucu kül ile yapılan betonlar hava kaybından dolayı olumsuz olarak daha az etkilenirler.
- Genel olarak uçucu külün  $SO_3$  içeriği artarken betondaki hapsolmuş hava miktarıda artar.

Taze betonda hava sürükleyici katkı ihtiyacının artmasına sebep olan mineral yan ürün yalnız uçucu kül değildir. Diğer mineral katkılar da benzer şekilde davranırlar ve hatta bazı çimentoların aşırı miktarda hava sürükleyici katkı katılmasına ihtiyaç duydukları da vakidir.

Bu güne değin uçucu kül ve hava sürükleyici maddeler arasında netlik kazanmamış ilişkileri açıklayacak kadar tatmin edici bir teori geliştirilememiştir. Betona hava sürüklenme mekanizması ve uçucu kül gibi ikincil bağlayıcı malzemelerin hava sürükleyici katkıların davranışına etkileri hakkında yapılacak kapsamlı çalışmalara ihtiyaç olduğu bir gerçektir.

## **2.2.5 Uçucu Külün Sertleşmiş Betonun Yapısal Özellikleri Üzerindeki Etkileri**

Uçucu kül sertleşmiş betonun özelliklerini bir ya da birkaç yönden etkileyebilir. Bu kısımda, uçucu kül kullanımının betonun aşağıdaki temel nitelikleri üzerindeki etkileri hakkında değerlendirme yapılacaktır :

- Mukavemet gelişimi
- Elastisite modülü
- Sünme, rötre ve termal genleşme

### **2.2.5.1 Uçucu Küllü Betonlarda Mukavemet Gelişimi**

Mineral katkı maddelerinin harç ve betonların mukavemetlerine olan etkileri bunların çimentonun bir kısmı yerine veya çimentoya ilaveten kullanılması, puzolanik aktiviteleri, kimyasal ve fiziksel özellikleri ile kullanım miktarları gibi faktörlere bağlıdır (2). Kısacası bu faktörler uygulamada karışım oranlama araştırmalarının tutarlılığı açısından oldukça önemli ve belirleyicidir.

Mukavemet gelişimi ile ilgili yapılmış erken çalışmaların çoğunda kullanılan uçucu küller eski güç santrallerinden elde edilmiş iri taneli, yanmamış kömür kalıntıları içeren dolayısı ile puzolanik olarak yeterince aktif olmayan uçucu küller idi. Bu uçucu küllerin basit ikame metodu ile oranlanmış betonlarda kullanılması istisnasız olarak mukavemet gelişimini olumsuz yönde etkiledi. Bu tür gözlemler, uçucu kül her yaşta dayanımı azaltır gibi genel bir kanının hakim olmasına yol açtı. Buna mukabil arzulanan mukavemet kazanma performansını elde etmek için çalışmalara devam eden bir çok araştırmacı uçucu küllü betonun dayanımını etkileyen faktörleri ve bu faktörlerin hangi yönde etkili olduklarını anlamak üzere sarfettikleri çabalar neticesinde çok değerli bazı sonuçlara ulaşılar.

#### **2.2.5.1.1 Uçucu Kül Tipinin ve Kimyasal Kompozisyonunun Mukavemet Gelişimi Üzerindeki Etkisi**

Bazı uçucu küllerin çimentonun varolmadığı durumda bile bağlayıcı özelliğe sahip olduklarını hatırlatmakta fayda vardır. Buna bağlı olarak bu özelliğe sahip olduğu kabul edilen C sınıfı uçucu küller F sınıfı uçucu küllere nazaran erken yaşlarda daha yüksek reaksiyon hızı gösterirler. Cook (1982) C sınıfı küller ile yaptığı çalışmalarda, Brink ve Halstead 'da (1956) F sınıfı küller ile yaptıkları çalışmalarda 45 mikronun altındaki tanecik miktarı ile orantılı olarak puzolanik aktivitenin her yaşta

arttığını göstermişlerdir. Özellikle C-sınıfı uçucu küller 28. günde çok iyi dayanım sonuçları vermiştir. Cook (1981), Pitt ve Demirel (1983) eşdeğer ağırlık esasına dayalı olarak bazı C sınıfı uçucu küllerin Portland çimentosu kadar etkin olduklarını ileri sürmüşlerdir. Buna mukabil bazı C sınıfı uçucu küllerde F sınıfı uçucu küllerin gösterdiği daha ileriki yaşlarda tipik dayanım kazanma davranışı göstermeyebilirler. Brink, Halstead (1956) ve Mather (1958) F sınıfı uçucu küllü betonlarda çimento kaynağının değiştirilmesinin beton mukavemetinde %20 nispetinde değişiklik meydana getirebileceğini göstermişlerdir. Örneğin %0,6 ya da daha fazla alkali içerikli çimentolar uçucu kül ile birlikte kullanıldıklarında genelde 28 günün ötesinde ölçülen dayanımlar için daha iyi neticeler vermişlerdir. Bununla birlikte potansiyel olarak alkaliye karşı reaktif agregalar kullanıldığı takdirde uçucu kül kullanılıyor olsa bile düşük alkali içeren çimentolar tercih edilmelidir [9].

Hornain ve arkadaşları (1992) uçucu külün içindeki yanmamış karbon miktarının mukavemet üzerinde olumsuz etkilerinin olmadığını saptamışlardır [14].

#### **2.2.5.1.2 Uçucu Kül Tane Boyutu ve Dayanım İlişkisi**

Tane boyutu dayanım gelişimini iki yönde etkileyebilir. Birinci yönde taze beton ile ilgili kısımda bahsedildiği gibi  $45\ \mu\text{m}$  'den daha büyük taneler su ihtiyacını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu gerçek erken yaşlarda uçucu kül reaksiyonunun düşük hızını telafi etmek üzere kullanılan karışım oranlama metodları için bir handikaptır. İkinci olarak , bağlayıcılık aktivitesi konsantre hamurdaki katı fazın yüzeyinde meydana geldiğinden yüzeyden merkeze doğru reaksiyona katılmamış ya da hidrate olamamış kısımlar mukavemet kazanımını etkilemektedir [5]. Bu sebeple yüzey alanı bu tür aktivitelerin işleyişinde önemli rol oynar. Crow ve Dunstan (1981) , çoğu çok farklı özelliklerde uçucu kül içeren 36 beton karışımı ile yaptıkları çalışmada şunları gözlediler :

"... külün inceliği puzolanik aktivite ile kabaca karşılaştırıldığında, daha ince küllerin çimento ile daha aktif olarak reaksiyona girdiği saptandı. İncelik faktörü düşük kireçli küllerin reaksiyonunda yüksek kireçli küllere nazaran daha kritik hal aldı."

Diğer yönden Wesche ve vom Berg (1981) 14 kaynaktan elde edilmiş uçucu küller üzerinde yaptıkları 340 'dan fazla test sonucunda test edilen harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ile incelik arasında bir korelasyon bulamazken , 90. güne gelindiğinde ufak bir korelasyon saptamışlardır. Sadece bir faktörü tayin etmek için tertiplenmiş deneylerde bir çok kaynaktan gelen farklı özelliklerdeki numuneler

incelendiğinde bu sonuçların elde edilmesi doğaldır. Çoğu uçucu külün mukavemet gelişimi üzerindeki değişken etkisi ile tane boyutu arasındaki zayıf korelasyon, sadece tane boyutunun uçucu kül reaktivitesinde belirleyici ya da baskın unsur olmadığı şeklinde yorumlanabilir. Tane boyutu ile basınç dayanımı arasında tutarlı bir ilişki kurabilmek için ya diğer tüm değişkenler sınırlanıp kontrol altına alınmalı ya da çok değişkenli bir deney programı uygulanmalıdır [1,s 48].

Joshi (1982) ve Ravina (1981) yaptıkları çalışmalarda bir tek kaynaktan farklı incelikte uçucu kül grupları elde etmek maksadıyla elektrostatik filtrelerde kendiliğinden tane boyutlarına göre ayrılmış uçucu külleri kullandılar. Uçucu kül elektrostatik filtrelerde birkaç kademede toplanmaktadır. Taneler inceldikçe yanma ünitesinden daha uzak kademelerde birikirler. Her kademede biriken küllerden ayrı ayrı almak suretiyle aynı kaynaktan, aynı zamanda farklı tane boyu dağılımına sahip kül numuneler elde edilmiş olur. Neyazık ki kademeler arasında değişen faktör yalnız tane boyutu değildir. Aynı zamanda kimyasal özellikler, özgül ağırlık ve taneciklerin morfolojisi de değişir. Kimyasal olarak karbon daha iri taneler ile birlikte ayrılmaya meyleder. Alkali sülfatlar ve kloridler ise filtrenin daha serin yerlerinde, daha ince tanelerin yüzeyinde birikme eğilimi gösterirler. Kontrol edilemeyen bu tür faktörlere rağmen külün incelik etkisini araştırırken başvurulabilecek en basit numune alma yöntemi budur [1,s 48].

Ukita ve arkadaşları (1992) sınıflandırılmış uçucu kül ile yapılmış betonların 28 günden sonra aynı su/çimento oranındaki kontrol betonuna göre süper bir mukavemet kazanma hızı gösterdiklerini rapor etmektedirler. Tazawa ve arkadaşları (1992) inceliği 200.000 - 1.300.000 cm<sup>2</sup>/gr olan uçucu küller ile yapılan harçlarda mukavemetin ileri yaşlarda çok hızlı arttığını gözlemişlerdir. Matsufuji ve arkadaşları (1992) özel bir yöntemle uçucu külden en ince taneleri ayırabilmişler ve inceliği 30 m<sup>2</sup>/gr olan kül ile 0.2 su/çimento oranında ürettikleri betonda 91 günde 127 MPa mukavemet elde edebilmişlerdir [14].

#### **2.2.5.1.3 Uçucu Kül Reaktivitesinin Mukavemet Gelişimine Etkisi**

Puzolanik reaktivite olayının varlığı fevkalade net bir şekilde ortaya çıkarılmışsa da işleyişinin çok iyi anlaşıldığını iddia etmek pek gerçekçi değildir. Günümüzde uçucu kül üzerine devam eden araştırmaların çoğu puzolanik reaksiyonları anlamaya yönelmiştir.

Bilindiği gibi silikatlar çimentonun esas iskeletini teşkil ederler ve hidrasyon sonunda Kalsiyum Silikat Hidrate [C-S-H] ve sönmüş kireç Ca(OH)<sub>2</sub> ürünlerini meydana getirirler. Portland çimentosunda cereyan eden bu reaksiyonun denklemi :



şeklinde ifade edilir.

$Ca(OH)_2$  'nin varlığı bir anlamda iyi değildir.  $Ca(OH)_2$  su içinde çözünür ve yeri boş kalır. Puzolanik reaktiviteyi sağlayan aktif silis taneleri serbest kireci bağlayarak kirecin suyun etkisi ile erimesini önler. İki reaksiyonda da ürün olarak Kalsiyum Silikat Hidrate meydana gelir. Puzolanik reaksiyon olarak adlandırılan bu ikinci reaksiyonun denkleminde aşağıdaki gibidir [2] :



Görüldüğü gibi birinci reaksiyon kireç üretir, ikincisi ise kireç tüketir formdadır.

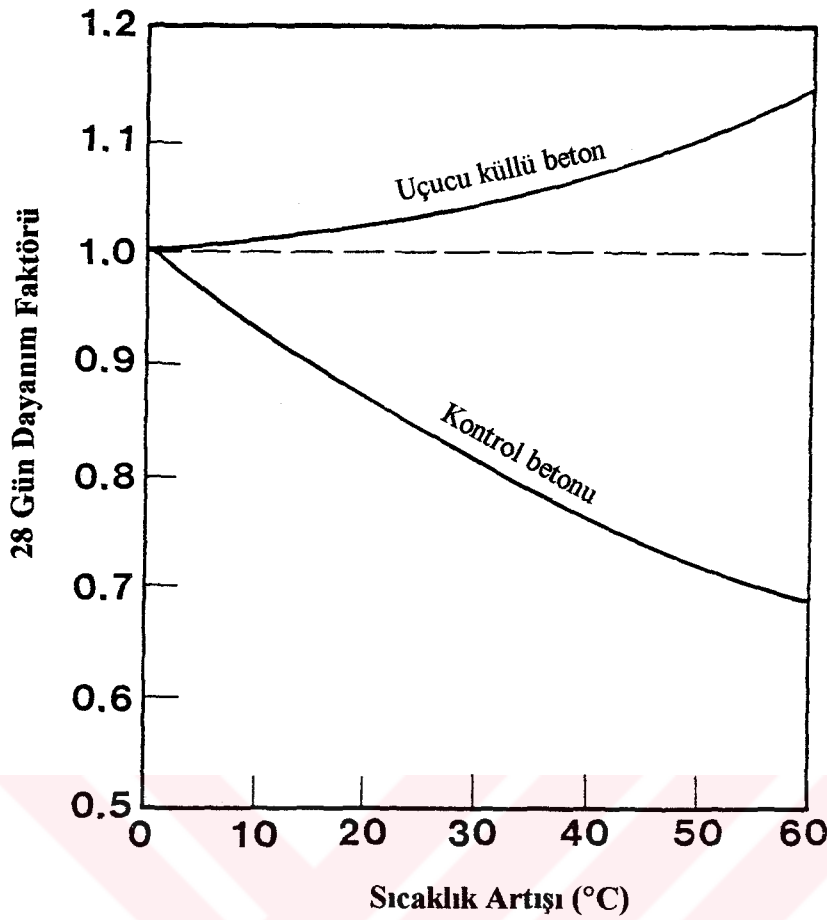
Puzolanik reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu beklemesi, hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki nedeniyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır [2]. Bilhassa betonun belirli bir olgunluk düzeyine oluşuncaya dek içinde bulunduğu kür koşulları betonun nihai dayanımına etki etmektedir. Bir başka deyişle bu koşullar puzolanik davranışın temel işlevi ile yakından ilişkilidir.

#### 2.2.5.1.4 Sıcaklığın Mukavemet Gelişimi Üzerindeki Etkisi

Uçucu küllü betonlar yükselen sıcaklık karşısında normal betonlara göre oldukça farklı davranmaktadırlar. Isınma sonucunda normal betonlarda meydana gelen dayanım kayıplarının aksine uçucu küllü betonların dayanımında artış gözlenir. Bu özellik kütle beton inşaatlarında ya da yüksek sıcaklıklara maruz beton konstrüksiyonlarda takdir edilecek bir üstünlüktür. Şekil 2.7 uygulanan kür boyunca sıcaklık artışının betonun 28 günlük dayanımı üzerindeki etkisini göstermektedir [1].

Kobayashi (1979) , Japonyadaki Kurobegwa No.3. güç santralının bir giriş tüneli için yapılan betonda çimento yerine %25 oranında uçucu kül kullanıldığını bildirmiştir. Bu tünelin, sıcaklığın 100 ila 160°C olduğu kaya tabakasının içinden geçmesi sebebi ile yalnız Portland çimentosu ile yapılmış betonun dayanımında azalma olabileceği hesaba katılarak uçucu kül kullanılması uygun bulunmuştur[1,s 52].

Carette, Painter ve Malhotra (1982) yüksek sıcaklığa (75 ila 600°C arasında) maruz kalmış bir betonun mekanik özelliklerinin uçucu külün kullanılması ile değişmediğini ileri sürmüşlerdir [9].



Şekil 2.7 Betonların Basınç Dayanımı Gelişiminde Kür Boyunca Sıcaklık Artışının Etkisi

Beton dayanımını belirleyici iki ana unsurun çimento miktarı ve su/çimento oranı olduğu bilinmektedir. Betonda uçucu kül kullanılması halinde kullanılan uçucu kül miktarı ve niteliği de direkt olarak bu unsurlara dahil olmaktadır. Uygulamada bu büyüklükler taze karışımlar için işlenebilirlik, sertleşmiş durum için dayanım, dayanıklılık ve ayrıca maliyet kıstaslarına uygun şekilde belirlenirler. Ekonomik açıdan ele alındığında çimento dozajının azaltılması maliyetin düşürülmesinde en etkin faktör olarak kabul edilebilir. Bu arada istenen proje dayanımı elbette sağlanmak zorundadır. Dayanım sabitliğinin sağlanabilmesi için azaltılan çimento miktarının uçucu kül ikamesi ile birebir oranda karşılanması uçucu külün bağlayıcılık özelliğinin çimentoya eşdeğer olduğunu varsaymaktır ki bu yaklaşım mantıki olmaktan uzaktır. Uçucu kül miktarını çimentonun belirli bir yüzdesi şeklinde belirleme yoluna gidilse, azaltılan çimento miktarı ve seçilen yüzdenin fonksiyonu olarak toplam bağlayıcı miktarı (çimento+uçucu kül) düşebilir, sabit kalabilir veya artabilir, yani çözümde kesinlik yoktur [10].

Akman, Öztekin ve Erdinç (1994) uygulamada hazır beton endüstrisinde kullanılan Orhaneli uçucu külü üzerinde çalışmışlar, deneysel çalışmalara dayalı olarak

dayanım için gerekli uçucu kül miktarı tayini için bir öneri geliştirmişlerdir. Laboratuvarıda uçucu kül ile ilgili alınan negatif sonuçlardan sonra uçucu külün puzolanik aktivitesinin araştırılması yoluna gidilmiştir. Bunun için uçucu kül önce atıl (inert) kum gibi düşünülerek basitleştirilmiş Bolomey formülündeki  $K_B$  katsayıları hesaplanmıştır. Uçucu kül katılımı sonucu  $K_B$  yüksek değerler aldığı takdirde uçucu külün aktivitesi bulunduğu kanıtlanmış olacağı varsayılmıştır. Nitekim elde edilen deneysel veriler de bu varsayımı doğrulamıştır.

Aynı deney sonuçlarından yararlanarak uçucu külün bağlayıcılığa katkısını belirleyen etkinlik faktörünü de (efficiency factor) hesaplamak mümkün olmuştur. Baron ve Corneille gibi araştırmacılar uçucu kül için bu faktörü "0.4" olarak önermektedirler. Bu çalışmada  $k_p$  (etkinlik faktörü) aşağıdaki formül vasıtası ile her karışım için ayrı ayrı hesaplanmıştır :

$$k_p = \frac{(f_c / K_B + 0.5)E - C}{(UK)} \quad (2.6)$$

(UK) = Uçucu kül miktarı (kg/m<sup>3</sup>)

$k_p$  faktörü %90 güvenlikle 0.358 ve 0.168 arasında değişmiş, ortalama 0.263 değerini almıştır. Bolomey formülü ,

$$f_c = K_B \left( \frac{C + 0.263(UK)}{E} - 0.5 \right) \quad (2.7)$$

şeklinde uygulandığında hesaplanan teorik dayanımlar, deneylerdeki gerçek dayanımların %92 'si ile %98 'i arasında değerler almıştır, bu sonuç modifiye toplam bağlayıcı hesabının doğru temellere oturduğunu ve basınç dayanımının su/(modifiye toplam bağlayıcı) oranının bir fonksiyonu olduğunu kanıtlamıştır. Nitekim Baron da bu oranı sabit tutarak dayanımların değişmemesini sağlamıştır.

Bu çalışma sonunda aşağıdaki iki önemli husus belirlenmiştir :

1-İstenilen basınç dayanımını sağlamak için gerekli uçucu kül miktarı, değiştirilmiş Bolomey formülünden elde edilebilir. Bağlayıcı miktarı çimento+uçucu kül değil, çimento+ $k_p$ (uçucu kül) miktarıdır.

2-Her uçucu kül için  $k_p$  değerini 0.4 almak doğru değildir, her uçucu külün ayrı bir  $k_p$  değeri olacaktır. Bu da uçucu kül kalitesinin bağlayıcılık faktörünü önemli biçimde etkilediğini göstermektedir.

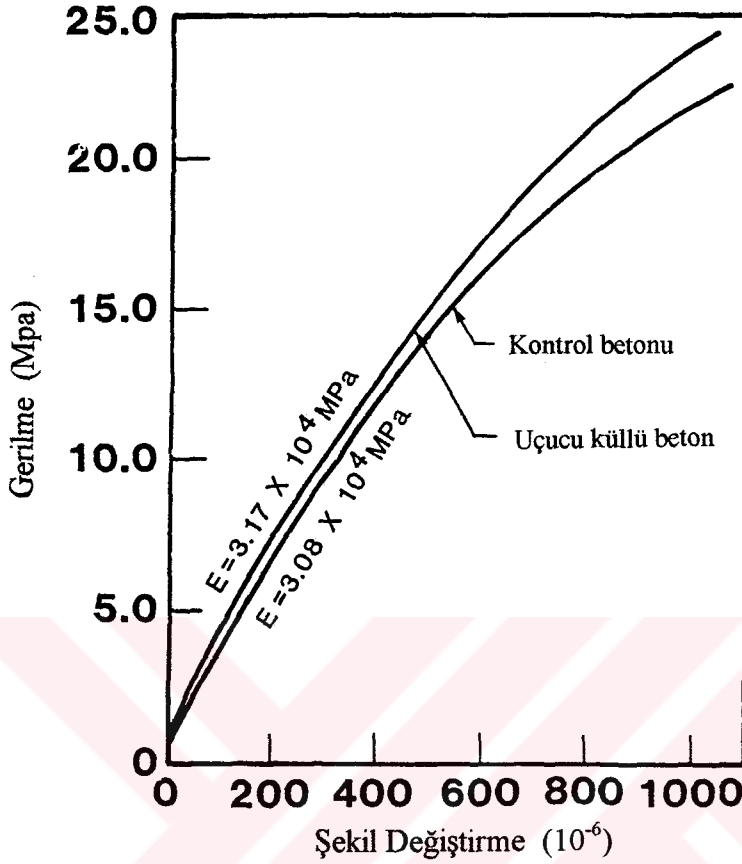
Dunstan ve arkadaşları (1992) yüksek miktarda uçucu kül içeren betonların basınç mukavemetlerinde 28 günden sonra önemli gelişmeler gözlemlendiğini ve bununla uçucu külün betonun uzun süreli mukavemetine olan olumlu katkısını gösterdiğini ileri sürmüşlerdir. Nasser ve Lai (1992) C tipi uçucu külün %20, %35 ve %50 oranlarında çimento yerine kullanılması durumunda 7 günde kontrol betonundan daha düşük mukavemetler elde etmişlerdir. %20 ve %35 kullanım oranlarında 28 günde kontrol betonunun mukavemetine erişilirken, 80 günde %20 kül içeren karışımın mukavemeti kontrol betonunu geçmekte, %50 kül içeren beton ise daha düşük mukavemette kalmaktadır. Joaquin ve arkadaşları (1992) F tipi uçucu külle yaptıkları betonlarda ilk mukavemetlerin kür şartlarından çok etkilendiğini gözlemişlerdir. Goma (1992) %60 uçucu kül içeren düşük işlenebilmeli betonların mukavemetlerinin erken yaşlarda daha düşük, 2 yıl sonra ise kontrol betonundan %18 daha yüksek olduğunu gözlemiştir. Kim ve arkadaşları (1992) F tipi uçucu kül ile yüksek mukavemetli beton üretiminde uçucu külün ilk mukavemetleri düşürdüğünü ancak uzun süreli mukavemetleri arttırdığını gözlemişlerdir. Ramyar (1992) Türkiye 'de üretilen 4 değişik uçucu kül ile yaptığı harç ve betonlarda erken mukavemetlerdeki olumsuz etkinin yüksek uçucu kül oranlarında daha bariz olduğunu ileri sürmektedir [14].

### 2.2.5.2 Uçucu Külün Betonun Elastik Özelliklerine Etkisi

Şimdiye kadar yayınlanmış bilgiler uçucu külün betonun elastik özellikleri üzerinde çok az etkiye sahip olduğuna işaret etmektedir. Abdun-Nur elastik özellikler ile ilgili yapılan ilk araştırmalar üzerine hazırladığı literatür çalışmasında uçucu küllü betonun elastisite modülünün erken yaşlarda daha düşük, sonraki yaşlarda daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Lane ve Best (1982) betonun basınç dayanımını etkileyen uçucu kül özelliklerinin daha az mertebede de olsa elastisite modülünü de etkilediğini ifade etmişlerdir. Şekil 2.8 uçucu küllü ve uçucu külsüz beton için tipik gerilme-şekil değiştirme ilişkisini göstermektedir [1].

Crow ve Dunstan (1981) elastik özellikler hususunda, çoğu farklı miktarlarda değişik kaynaklardan elde edilmiş uçucu kül ihtiva eden 36 betonu inceleyerek vardıkları sonuçlara göre uçucu küllü betonların elastik özelliklerinin sadece portland çimentosu içeren betonların elastik özelliklerine benzer olduğu zannedilmektedir.

Elastisite modülü ve poisson oranının her ikisi de basınç mukavemetine paralel olarak yaş ile birlikte artmıştır [1,s 55].



**Şekil 2.8** Uçucu Küllü ve Normal Betonlar için Gerilme-Şekil Değişirme İlişkileri

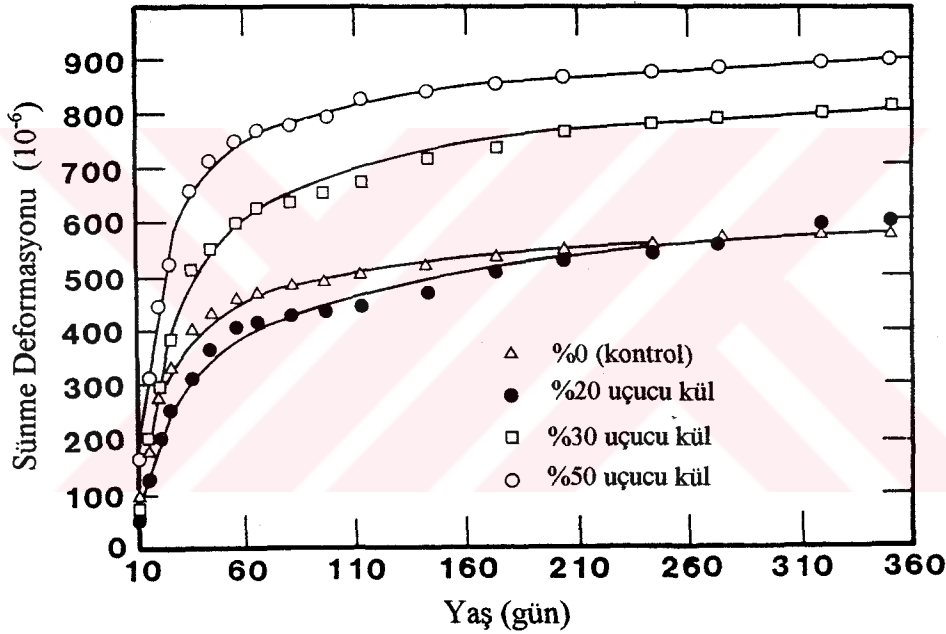
Naik ve arkadaşları (1991) büyük hacimde ASTM F sınıfı uçucu kül içeren betonların sekant elastisite modüllerini hesaplamışlardır. Uçucu küller iki farklı kaynaktan sağlanmıştır. Elde ettikleri sonuçlar %60 ikame oranına kadar uçucu kül kullanımının arzulanan elastisite modülü değerlerini vermeye yettiğini göstermiştir[11].

Bilodeau ve Malhotra (1992) %58 oranında F-tipi uçucu kül içeren betonlarda yüksek elastisite modülleri elde edildiğini ve bununda hidrate olamayan uçucu kül tanelerinin agrega gibi etki yapmasından kaynaklanabileceğini ileri sürmüşlerdir. Galeota ve arkadaşları (1992) %18 ve %25 oranlarında F-tipi uçucu kül içeren betonların elastisite modüllerinin aynı mukavemetteki kontrol betonu ile aynı olduğunu ileri sürmüşlerdir [14].

### 2.2.5.3 Uçucu Külün Betonun Sünme Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Uçucu küllü betonun sünme davranışı ile ilgili bilgiler oldukça sınırlıdır. Betondaki sünme deformasyonunun nispeti ve büyüklüğü ortam ısı ve nem koşulları, betonun mukavemeti ve elastisite modülü, agrega miktarı, yüklendiği zamanki beton yaşı, yükleme anındaki devamlı sünme gerilmesinin dayanıma oranı gibi faktörlere bağlıdır. Herşeyden önce uçucu kül betonun nihai dayanımına ve dayanım kazanma hızına etki ettiğinden doğal olarak betonun sünme davranışına da etki edecektir.

Yuan ve Cook (1983) Şekil 2.9 da verileri görülen yüksek kalsiyumlu uçucu kül içeren yüksek dayanımlı bir betona ait çalışmalarında %30 ve %50 oranlarında uçucu kül ikame edilmiş betonlarda kontrol betonu ve %20 uçucu kül ikame edilmiş betona nazaran daha fazla sünme meydana geldiğini göstermişlerdir [1,s 58].



Şekil 2.9 Uçucu Küllü Betonların Sünme Davranışları

Gifford ve Ward (1982) dolgu kütle betonu üzerinde incelemeler yapmışlar ve aşağıdaki yargıları savunarak uçucu külün sünmeyi azalttığı sonucuna varmışlardır[1]:

- Uçucu kül elastisite modülünü artırır.
- Uçucu kül toplam agrega miktarına katkıda bulunur ve sünmeye sebep mevcut hamur hacmini azaltır.

Bilodeau ve Malhotra (1992) yüksek oranda uçucu kül kullanılan betonda sünme değerlerinin oldukça düşük olduğunu rapor etmişlerdir [14].

#### 2.2.5.4 Uçucu Külün Rötreye Üzerindeki Etkisi

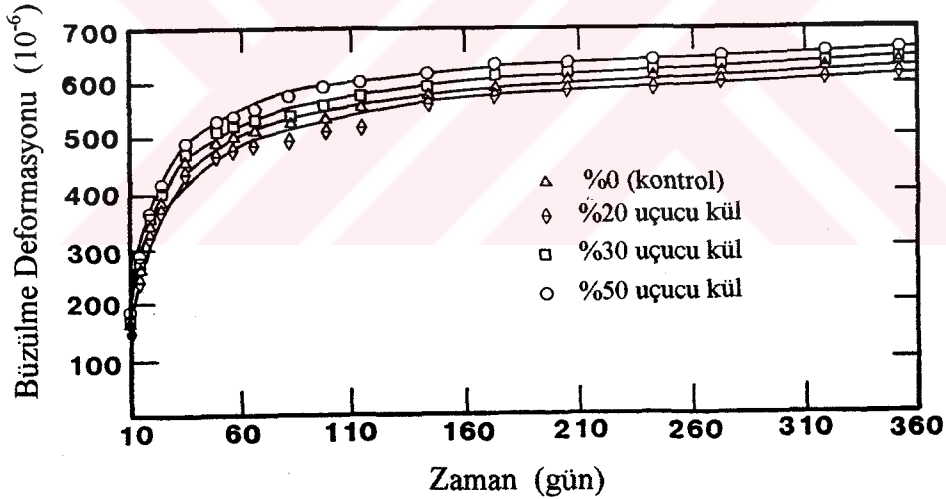
Uçucu kül normal oranlarda kullanıldığı takdirde betonun rötresini önemli ölçüde etkilemediği yapılan yayınlarda yaygın olarak ifade edilmiştir.

Davis (1937) yaptığı araştırmalar neticesinde ince öğütülmüş, erken dayanımı yüksek çimento içeren çok ince beton elemanların rötresinin uçucu kül kullanarak azaltılabileceği sonucuna varmıştır [1,s 59].

Ghosh ve Timusk (1981) aynı maksimum agregatane çapı için tüm dayanım düzeylerinde uçucu kül içeren betonun rötresinin uçucu kül içermeyen betonunkine nazaran daha az olduğunu göstermişlerdir [1,s 60].

Yuan ve Cook (1983) betonda yüksek kalsiyumlu uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmalarında çimentonun uçucu kül ile yerdeğiştirmesinin rötreye üzerinde önemsiz mertebede bir etki yarattığı sonucuna ulaşmışlardır. Elde ettikleri veriler Şekil 2.10 da görülmektedir [1,s 62].

Aimin (1992) mukavemetleri 30-60 Mpa arası olan harçlarda uçucu külün rötreyi azalttığını ileri sürmüştür [14].



Şekil 2.10 Yüksek Kalsiyumlu Uçucu Kül Kullanılmış Betonların Rötresi

#### 2.2.6 Betonun Ortam Şartlarına Dayanıklılığı Üzerinde Uçucu Külün Etkisi

Betonun, bulunduğu koşullar içerisinde sahip oldukları nitelikleri bozulmadan belirli bir servis ömrünü tamamlaması gereklidir. Böyle bir beton durabil beton olarak anılır [12]. Durabilite problemi betonun maruz kaldığı dış ortam koşullarına ya da kendi içindeki dahili sebeplere bağlı olarak ortaya çıkabilmektedir. Harici sebepler fiziksel, kimyasal, mekanik ve hatta biyolojik olabilirler. Ardarda oluşan ıslanma-

kuruma, donma-çözülme, aşınma, doğal ya da endüstriyel sıvı gazların kimyasal etkileri, aşırı sıcaklık bu tür sebeplerden sayılabilirler. Dahili sebepler beton için seçilen malzemelerin niteliğine bağlı olarak ortaya çıkabilmektedirler. Alkali - agreg reaksiyonu, agreg ve çimentonun termal özelliklerindeki farklılıklara bağlı hacim değişiklikleri dahili sebeplere örnek olarak verilebilirler.

Hemen hemen tüm durabilite problemlerinde ilk çare boşluk oranı düşük, dolu bir beton üretebilmektir. Dolu bir beton mekanik yönden yüksek mukavemetli olması yanında aynı zamanda geçirimsizdir. Bu genel kural asla unutulmamalıdır [8].

Agresif ya da potansiyel olarak agresif ortamlarda beton gün geçtikçe daha fazla tercih edilen bir yapı malzemesi olmaktadır. Petrol ya da doğal gaz araştırmak ve üretmek maksadıyla çok soğuk, ılıman ya da tropik deniz suyu ortamlarında inşa edilen konstrüksiyonların malzemesi olarak beton gittikçe yaygınlık kazanmaktadır. Nükleer santrallarda, sıcaklığı yüksek ve basınçlı ortamlardaki gazları ve buharı kontrol altında tutmak için beton yapılar seçilmektedir. Beton, sülfatlı ve asitli suların var olduğu ortamlarda da gün geçtikçe daha güven duyularak kullanılmaktadır. Bütün bu uygulamalarda beton malzemesi olarak uçucu külün de kullanılması ile uçucu kül de durabilite faktörüne etki eden bir bir unsur olmaktadır. Uçucu külün uygulamada doğru şekilde ve ekonomik olarak kullanılabilmesi için beton durabilitesi üzerindeki etkisinin iyi anlaşılması gerekir.

#### 2.2.6.1 Uçucu Külün Betonun Geçirimliliği Üzerindeki Etkileri

Bazı zararlı sular betonun içine nüfuz ederek betonun dayanıklılığına menfi tesirde bulunabilirler. Çimentonun açığa çıkardığı reaksiyon ürünü  $\text{Ca(OH)}_2$  'nin su içinde çözülüp beton dışına süzülmesi ile yerinde boşluk meydana gelmektedir ve bunun tabii neticesinde bu zararlı solüsyonlar meydana gelen boşluklardan betonun içine sızabilmektedirler. Nüfuz etmenin derecesi betonun geçirimliliğine bağlıdır. Genel olarak daha az geçirgen betonun zararlı ya da saf sulara daha dirençli olacağı kabul edilmektedir. İyi sıkıştırılmış ve kür edilmiş olmalarına bağlı olarak madde transfer aktiviteleri düşük betonlar ile hidrate olmuş bileşiklerinin çözünülebilirlik kabiliyeti düşük olan betonlar sulu ortamlara dayanıklı olmaktadır.

Çimento yerine değişik oranlarda uçucu kül ikame ederek üretilmiş beton boruların geçirimliliği üzerinde uçucu külün fonksiyonunu incelemek maksadıyla bir çok araştırma yapılmıştır. Davis 'in (1954) 28. günde ve 6. ayda yaptığı geçirimlilik testlerinden elde ettiği verilere göre betonun herhangi bir yaştaki geçirimliliğinin direkt olarak hidrate olmuş bağlayıcı malzemenin miktarı ile ilişkili olduğu sonucu

ortaya çıkmıştır. Puzolanik aktivitenin yeterince ortaya çıkmadığı 28 günlük kürün ardından uçucu küllü betonların kontrol betonlara nazaran daha geçirimli oldukları gözlemlendi. Ancak 6 ay sonra bu durum tersine döndü. Uçucu külün Puzolanik etkisine isnad edilerek geçirimlilikte son derece dikkat çekici bir azalma gözlemlendi [1].

Kanitakis (1981) düşük kireçli ( CaO %2 ) uçucu kül içeren betonlar ve normal betonlar üzerinde çalışarak erken yaşlarda uçucu küllü betonların düşük dozajlı betonlar gibi davrandığını ve bu yüzden geçirimliliğin kaçınılmaz olduğunu ileri sürdü [1,s 90].

Manmohan ve Mehta (1981) çimento hamuru ve uçucu kül arasındaki puzolanik reaksiyonun bir sonucu olarak büyük boşlukların küçük boşluklara dönüştüğünü ve neticede bağlayıcı sistemde geçirimliliğin azaldığını saptamışlardır [1,s 91].

Sarıçimen ve arkadaşları (1992) arazi ve laboratuvar kür şartlarının normal ve uçucu küllü betonların geçirimliliğine etkilerini incelemişler, geçirimsizliğin sağlanması için sürekli su kürünün gerekli olduğu sonucuna varmışlardır [14].

Beton bünyesine klor gibi iyonların difüzyonu Fick 'in difüzyon denklemi ile ifade edilebilir [1] :

$$\frac{dc}{dt} = D_c \cdot \frac{d^2c}{dx^2}$$

Burada :

C = Bir x uzaklığında, t zaman sonraki klorid iyonu konsantrasyonu

D<sub>c</sub> = Klor iyonu difüzyon sabiti

Short ve Page (1982) Portland ve katkılı çimento hamurlarına klor iyonlarının difüzyonu hakkında yaptıkları çalışmada farklı çimento tipleri için aşağıdaki D<sub>c</sub> değerlerini bulmuşlardır :

| <u>Çimento tipi</u> | <u>D<sub>c</sub> × 10<sup>9</sup> (cm<sup>2</sup> /s)</u> |
|---------------------|-----------------------------------------------------------|
| Normal Portland     | 44.7                                                      |
| Sülfata dayanıklı   | 100                                                       |
| Uçucu küllü         | 14.7                                                      |
| Cürufu              | 4.1                                                       |

Bu verilerden cürufu ve uçucu küllü çimentoların hamur fazındaki Cl difüzyonunu sınırlamak açısından normal ya da sülfata dayanıklı çimentolara göre daha etkili oldukları sonucu çıkarılmıştır [1].

Akman, Öztekin ve Erdiç hızlandırılmış klor geçirimliliği metodunu kullanarak çeşitli dayanım düzeyleri için aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır [10] :

- Uçucu kül ilavesi Cl geçirimliliğini BS 14 ve BS 18 betonlarında %50 mertebesinde düşürmüştür.
- Uçucu kül oranının etkisi , katılım oranı düşük (%4.5) yüksek mukavemetli betonlarda (BS 25) bir miktar negatif olmuştur. Etkinin pozitif olabilmesi için uçucu kül oranının nispeten yüksek olması gereklidir.
- Uçucu kül oranı yüksek BS 14 ve BS 18 betonlarında yaşlanma ile geçirimlilik azalmakta, BS 25 'de ise hafifçe artmaktadır.

Marusin (1992) %25 uçucu kül içeren betonlarda rutubetli kür süresi arttıkça klor geçirgenliğinin azaldığını gözlemiştir. Torri ve Kawamura (1992) uçucu kül, yüksek fırın cürufu, ve silis dumanının betonun boşluk yapısı ve klor geçirgenliğine etkilerini inceledikleri çalışmalarında kür ve ortam şartlarına bağlı olmaksızın mineral katkı betonların daha geçirimsiz olduklarını gözlemişlerdir [14].

#### **2.2.6.2 Uçucu Külün Betonun Karbonatlaşması Üzerindeki Etkileri**

Portland çimentosunun hidratasyonu sonunda teşekkül eden serbest kireç  $\text{Ca(OH)}_2$  atmosferde bulunan karbondioksit ile birleşerek kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) meydana gelir. Tüm Portland çimentosu betonları için söz konusu olan bu olay karbonatlaşma olarak adlandırılır [13]. Betonda karbonatlaşmanın nispeti betonun geçirimliliği, suya doygunluk derecesi ve reaksiyon için mevcut kalsiyum hidroksit kütlesine göre belirlenir.

İyi sıkıştırılmış ve uygun şekilde kür edilmiş düşük su/çimento oranına sahip betonlar ilk birkaç milimetrenin ötesinde karbonatlaşmanın ilerlemesine direnecek kadar yeterince geçirimsiz olacaktır. Eğer bir beton kütlenin içinde karbonatlaşma ilerlerse bu durumu üç istenmeyen sonuç takip edebilir :

- Geçirimlilik artabilir
- Rötre meydana gelebilir
- Betonun karbonatlaşması aynı ortamdaki çelik donatının korozyona direncini azaltabilir.

1968 yılında Japonya 'da beton ile ilgili yapılmış uzun süreli araştırmalardan katkılı çimentolar ile yapılmış betonların normal portland çimentosu ile yapılmış betonlara nazaran daha çabuk karbonatlaşmaya maruz kaldıkları sonucuna varılmıştır [1].

Tsukayama ve arkadaşları (1980) Japonya 'da hali hazırdaki uçucu küllü betonların üzerinde yürüttükleri çalışmalardan elde ettikleri verileri yayınlamışlar, karbonatlaşma derinliğinin aşağıdaki açılardan betonun kalitesi ile ilişkili olduğunu iddia etmişlerdir [1,s 93]:

- su/çimento oranı (uçucu külü hariç tutarak) ile karbonatlaşma derinliği arasında lineer bir ilişki bulunmuştur.
- Uçucu kül ilave edildiğinde aynı su/çimento oranlarında karbonatlaşma derinliğinin önemsiz miktarda azaldığı saptanmıştır.

Gebauer (1982) 100×50×7 cm boyutlarındaki betonarme plakları incelemiştir. Plaklara 7 gün 20 ° C de ve %95 nispi nemli ortamda kür uygulanmıştır. Daha sonra her karışım kombinasyonuna ait bir plak dış havada test edileceği ortamda, kontrolü olan plakta rutubetli kür koşulları altında saklanmıştır. 28 ve 365. günlerde aynı betonların prizmaları üzerinde basınç dayanımları ölçülmüştür. Gebauer karbonatlaşma derinliğinin ;

- Dayanım azaldıkça (kompozisyon ne olursa olsun)
- su/çimento oranı arttıkça
- Çimento içeriği azaldıkça
- Uçucu kül içeriği arttıkça, arttığını ileri sürmüştür [1,s 95].

Neticede, iyi kalitede uçucu küllü bir beton da normal bir betonla kıyaslanabilecek kadar karbonatlaşmaya karşı koyabilir. Zaten çimento faktörü düşük, yeterince kür uygulanmamış (rutubet ya da sıcaklığa bağlı olarak) bir betonun karbonatlaşma da dahil kimyasal ve fiziksel tüm zararlı formlara karşı dayanıksız olacağı sürpriz olmamalıdır.

#### **2.2.6.3 Betonun Tekrarlı Donma-Çözülme Çevrimlerine Dayanıklılığı Üzerinde Uçucu Külün Etkisi**

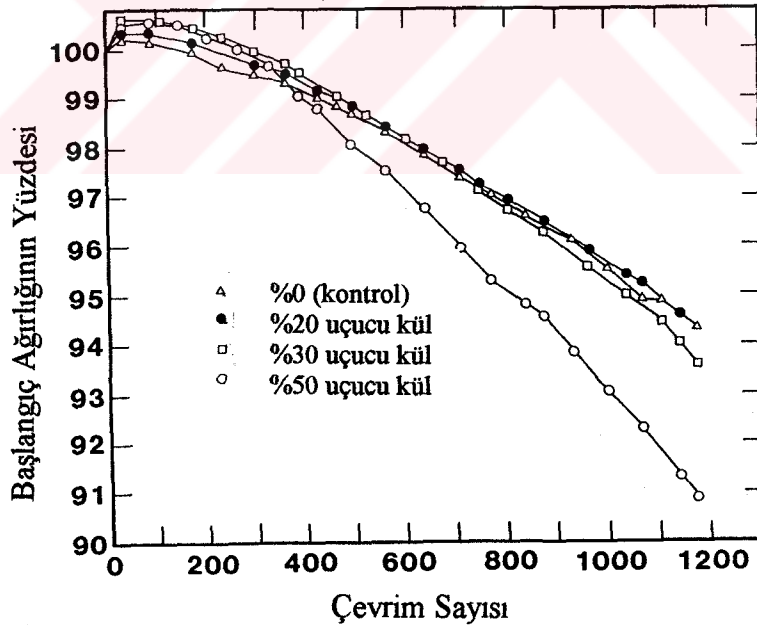
Uçucu küllü ya da normal betonların donma ve çözülme hasarlarına gösterdikleri direnç, mevcut hava boşluğu sistemin yeterliliğine, agregaların dona dayanıklılığına, yaşa, hidratasyon (olgunluk) derecesine, çimento hamurunun

dayanımına ve betonun içinde bulunduğu rutubet koşullarına bağlıdır. Genelde F sınıfı uçucu kül kullanılan betonlarda dayanım gelişimi daha yavaş gerçekleştiğinden 28. gündeki karşılaştırılabilir olgunluğa ulaşabilmek için daha fazla miktarda bağlayıcı malzeme (çimento+uçucu kül) kullanılır. Bağlayıcı malzeme miktarındaki bu artış genelde betonun birim hacmi için gerekli hava sürükleyici katkı miktarında da artışa sebep olur.

Yuan ve Cook (1983) yüksek kalsiyumlu uçucu kül ilave edilmiş betonların (hava sürüklenmiş veya sürüklenmemiş) donma ve çözülme dirençlerini inceleyerek aşağıdaki gözlemleri yapmışlardır :

- Uçucu kül kullanılmış olsun veya olmasın hava sürüklenmiş betonların donma ve çözülme dirençleri daha yüksektir.
- %20 uçucu kül içeren betonların kontrol betonuna nazaran daha dayanıklı oldukları bulunmuştur.
- Hava sürüklenmiş betonda uçucu kül ikame oranı %50 'ye kadar arttığı takdirde 400 çevrimden sonra ölçülebilen hasarda buna bağlı olarak artmıştır.

Şekil 2.11 de hava sürüklenmiş uçucu küllü betonlarda donma-çözülme çevrimi sayısı ile betondaki kütle kaybı arasındaki ilişki görülmektedir [1,s 103].



**Şekil 2.11** 14 Günlük Kürden Sonra Hava Sürüklenmiş Uçucu Küllü Betonlar için Donma-Çözülme Çevrimi Sayısına Bağlı Olarak Meydana Gelen Kütle Kaybı

Virtanen (1983) uçucu kül, silis dumanı ve cüruf içeren betonların donma ve çözülme dirençlerini karşılaştırarak aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır [1,s 106]:

- Hava içeriği betonun donma- çözülme direnci üzerindeki en büyük etkidir.
- Dayanım ve hava miktarı sabit tutulduğunda uçucu kül ilave edilmesinin betonun donma - çözülme direnci üzerinde büyük etkisinin olmadığı gözlenmiştir.
- Çimentonun büyük bir kısmı yerine yüksek fırın cürufu ya da uçucu kül kullanıldığında betonun donma - çözülme direnci üzerinde olumsuz bir etki meydana gelebilmektedir.

Genelde betona hava sürükleyici bir madde katmak betonun donma-çözülme direncini iyileştirmektedir. Betona uçucu kül ilavesi hava sürükleyici madde ihtiyacını artırır. Buna karşın betonun hava boşluğu sistemini etkilemez [11].

Sturup ve arkadaşları (1987) F-sınıfı uçucu küllü betonların donma-çözülme performansları ile karbon miktarı arasında ilişki kurmaya çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar durabilite faktörü ve karbon miktarı arasında çok zayıf korelasyon olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte donma ve çözülme çevrimleri ile betonun kütle kaybı arasında önemli bir korelasyon gözlenmiştir [11].

Nasser ve Lai (1992) hava sürüklenmiş betonlarda hızlı donma- çözülme tekrarı deneyleri yapmışlar ve %20 uçucu kül içeren betonların yeterli dayanım gösterdiğini ancak uçucu kül oranının artmasıyla durabilite faktörünün azaldığını gözlemişlerdir[2].

Dunstan tarafından yapılmış (1985) bir çalışmadan elde edilen sonuçlar uçucu küllü betonların donma-çözülme dayanıklılıklarının basınç dayanımı ve betona sürüklenmiş hava miktarı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu veriler aynı zamanda eşit basınç dayanımlarında, uçucu küllü betonların kontrol betonlara nispeten eşit ya da az bir miktar daha iyi donma çözülme dayanıklılığı gösterdiğini ortaya çıkarmıştır [11].

Mather'a göre (1988) betona uçucu kül ilave edilmiş olsun ya da olmasın eğer ;

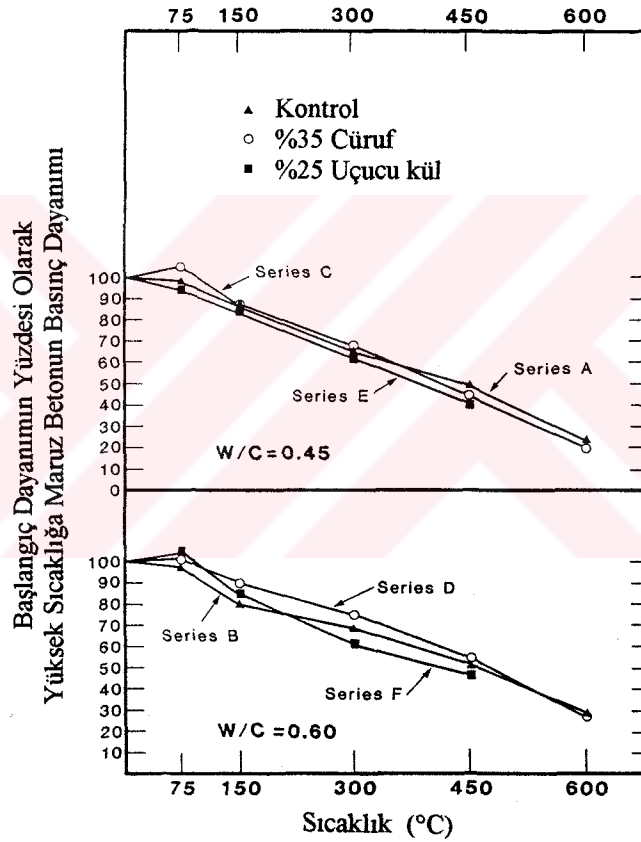
- Beton kritik derecede su emmiyorsa
- Betona uygun şekilde hava sürüklenmişse
- Donma ve çözülme ortamına maruz beton takriben 4000 psi (28 Mpa) basınç dayanımına sahip ise
- Beton fiziksel, mekanik ve kimyasal etkilere dayanıklı agrega ile yapılmışsa
- Konstrüksiyon icapları uygun şekilde uygulanmışsa (özellikle yüzeye şekil verme uygulamaları)

beton donma çözülme etkisine karşı dayanıklı olacaktır [11].

### 2.2.6.4 Yüksek Sıcaklıklara Maruz Betonun Dayanıklılığı Üzerinde Uçucu Külün Etkisi

Nükleer reaktör yapıları gibi bazı ortamlarda kullanılacak betonun yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olması istenir.

Nasser ile Lhotia (1971) ve Nasser ile Marzouk (1979) normal ve uçucu küllü betonların 230 ° C 'ye kadar gösterdikleri davranışı incelemişlerdir. Carette, Painter ve Malhotra (1982) 600 ° C 'ye kadarki sıcaklıklarda saklanmış normal portland çimentolu, cüruf lu ve uçucu küllü betonlar üzerinde çalışmışlardır. Bu araştırmadan elde edilen bilgiler Şekil 2.12 de görülmektedir. Genel olarak uçucu külün ilavesi betonun yüksek sıcaklıklardaki davranışını etkilememektedir [1,s 109].



Şekil 2.12 Betonların Bir Ay Değişik Şiddetlerde Yüksek Sıcaklığa Maruz Kaldıktan Sonraki Basınç Dayanımları

### 2.2.6.5 Uçucu Küllü Betonların Aşınması ve Erozyonu

Beton bir çok ortamda bazı tabiat olaylarının, bazı nesnelerin ve araçların aşındırma, kazıma ya da kayma hareketlerine maruz kalmaktadır. Su akışının olduğu yüzeylerde, endüstriyel zeminlerde ve otoyollarda bu tür etkilere sık rastlanmaktadır. Betonun aşınmaya olan direnci su/çimento oranı, basınç dayanımı, yüzey şekillendirme ve kür koşulları gibi faktörlere bağlı olarak değişir.

Tikalsky ve Carrasquillo (1985) uçucu kül içeren betonların aşınma dirençlerinin basınç dayanımları ile ilişkili olduğunu bulmuşlardır. Eşit dayanıma ve olgun yaşa sahip betonlar kıyaslandığında uçucu küllü betonun aşınma direncinin normal betona nazaran daha üstün olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte yazarlar, aşınma direncinin betonun hamur fazının hacmi ile de ilişkili olduğuna dikkat çekmişlerdir [11].

Liu (1980) yeni geliştirilmiş su altında aşınma testini kullanarak betonun aşınma- erozyon direncini incelemiştir. Liu portland çimentosu yerine hacimce %25 oranında uçucu kül ikame edilmiş betonlar ile normal betonları kıyaslamıştır. 90 gün kür edilmiş, ortalama basınç dayanımı 49 MPa olan uçucu küllü betonun aşınmaya karşı dayanıklılığı, benzer karışım oranlarına sahip, 28 gün kür edilmiş, ortalama basınç dayanımı 47 Mpa olan normal betonun dayanıklılığı ile karşılaştırılmıştır. 36 saatlik test periyodu sonunda iki betonun aşınma dirençleri arasında önemsenmeyecek farklılıklar gözlenmiştir. 72 saatin ötesindeki daha uzun periyotlu testlerde uçucu küllü beton normal betonla karşılaştırıldığında, uçucu küllü betonun aşınma ve erozyona bağlı olarak yaklaşık %25 nispetinde daha fazla kütle kaybına uğradığı tespit edilmiştir [11].

Günümüzde, uçucu kül kullanımı ile aşınma arasında herhangi bir ilişki kurmak için yeterince bilginin olmadığını kabul etmek gerekir. Çeşitli koşullar altında meydana gelen farklı aşınma ve erozyon formları için uçucu küllü betonun gösterdiği performansın bir an evvel araştırılması gerekmektedir.

#### **2.2.6.6 Betonların Zararlı Kimyasallara Dayanıklılığı Üzerinde Uçucu Külün Etkisi**

Beton için söz konusu kimyasal etkileri iki grupta toplayabiliriz [8]:

- Dış etkiler - Betonu çevreleyen ortamın oluşturduğu zararlı etkiler.
- İç etkiler - Beton içindeki bileşenlerin, agrega-çimento-su gibi, karşılıklı etkileşimi sonucu ortaya çıkan zararlı etkiler.

Kalsiyum hidroksitin çözülerek beton dışına süzülmesi, atmosferik ve erimiş haldeki karbondioksit hareketi, çimento bileşenlerinin boşluk solüsyonundaki iyonlarla olan reaktivitesi betonu zararlı kimyasal etkilerle yüzyüze getiren başlıca sebeplerdir.

Biczok (1964) agresif suların zararlı etkileri açısından beton kalitesi ve betonu meydana getiren bileşenler arasındaki ilişkinin 4 faktöre bağlı olduğunu ileri sürmüştür [1,s 111]:

- Kullanılan çimentonun tipi, kimyasal ve fiziksel özellikleri
- Agregaların kalitesi, fiziksel özellikleri ve granülometrisi
- Beton üretimi için öngörülen metod, su/çimento oranı, toplam bağlayıcı miktarındaki çimento oranı
- Betonun yüzeyini çevreleyen ortam koşulları

Uçucu külün belirli oranlarda portland çimentosu yerine kullanılmasının bu faktörler üzerinde dolaylı olarak etkisi olmaktadır. Erken yaşlarda sadece inert bir bileşen gibi davranan uçucu kül, daha ileriki yaşlarda bağlayıcı bileşenlerin formasyonuna katkıda bulunur. Sonuçta, puzolanik reaksiyonlar vasıtası ile çimentonun hidrasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksiti daha az reaktif kalsiyum silikatlara ve alüminatlara dönüştürür.

DeneySEL verilerin ışığında puzolan katkılı betonun uzun vadedeki dayanımı, su geçirmezliği ve agresif ortamlara direnci artmaktadır sonucuna varılabilir. Bu genel bakış açısı dışında uçucu külün, betonun bağlayıcı bileşenlerinin kimyasal dengesi üzerinde oynadığı rol ile ilgili olarak mevcut literatürde gerek uygulanan test metodları bakımından gerekse durabilite ile ilgili elde edilen sonuçlar bakımından azda olsa farklı yaklaşımlara rastlanmaktadır. Örneğin, Bilodeau ve Malhotra (1992) yaptıkları bir çalışmada yüksek oranda uçucu kül içeren hava sürüklenmiş ve süperakışkanlaştırıcı betonlarda buz çözücü tuzlara dayanıklılığın iyi olmadığını gözlemişlerdir. Erdoğan ve arkadaşlarının (1992) üç değişik yüksek kireçli uçucu kül ile ürettikleri harç numunelerinde uçucu kül miktarının artmasıyla sülfat etkisine bağlı boy uzamaları lineer olarak artmıştır [14]. Sülfat etkisi ile ilgili detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.

#### **2.2.6.7 Sülfat Etkisine Maruz Betonun Dayanıklılığına Uçucu Külün Etkisi**

Uçucu küllü betonun sülfata dayanıklılığı normal bir beton ile aynı faktörlere bağlı olarak değişir. Bunun yanısıra uçucu külün sülfata karşı gösterdiği performans, tipine, miktarına, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Genel bir yaklaşım olarak F-tipi uçucu küllerin ilave edildikleri karışımların sülfata dayanıklılıklarını iyileştirdiği kabul edilirken, C sınıfı uçucu küller için durum bu kadar net değildir.

1937 yılında Davis ve arkadaşları bazı uçucu küllerin betonun sülfat etkisine olan direncini arttırdığını, bazılarının etkisiz olduğunu ve hatta bir kısım uçucu küllerin sülfata dayanıklılığı olumsuz yönde etkilediğini ileri sürmüşlerdir. Dunstan 1976 yılında linyit ya da alt sınıf bitümlü kömür kaynaklı uçucu kül kullanarak yaptığı beton karışımlar üzerinde uyguladığı deneylerden bu tip küller ile yapılan betonların sülfat etkisine gösterdikleri direncin daha düşük olduğu sonucuna vardı. 1980 yılında

çalışmasını genişleterek konu ile ilgili özet bir rapor yayınladı. Bu rapor sülfat etkisinin teorik analizini ve sebeplerini içermektedir. Dunstan tezinde uçucu küllü betonun sülfata dayanıklılığının uçucu külün  $\text{CaO}$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriğine bağlı olduğunu savunmuştur. Uçucu küldeki  $\text{CaO}$  %5 gibi bir alt limitin üstüne çıktığında ya da  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriği azaldığında sülfata dayanıklılığında azaldığını belirtmiştir ve buna bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanmış bir (R) rezistans faktörünün kullanılmasını teklif etmiştir [1,s 114]:

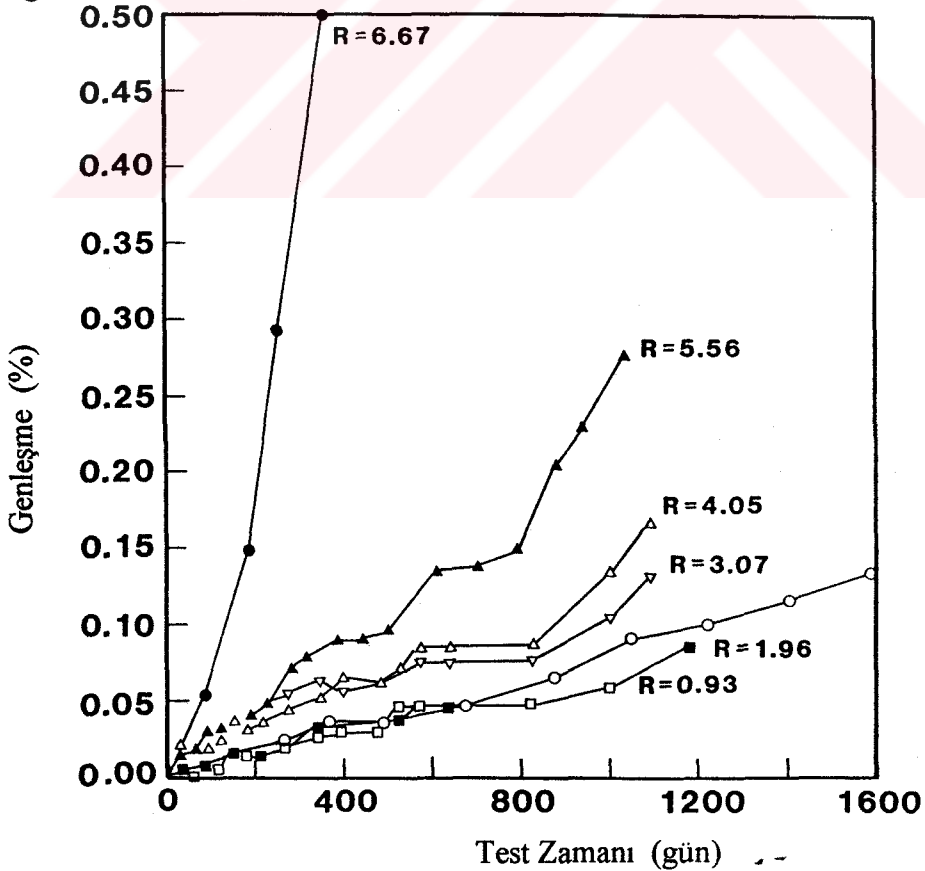
$$R = \frac{(C - 5)}{F} \quad (2.9)$$

Burada :

C=  $\text{CaO}$  yüzdesi

F=  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi

Şekil 2.13 de laboratuvar da sülfatlı solüsyona batırılarak sülfata dayanıklılık testine tabi tutulmuş yüksek kireçli uçucu kül içeren beton numunelerden elde edilen veriler görülmektedir.



Şekil 2.13 Yüksek Kireçli Uçucu Kül İçeren Betonların Sülfat Genleşmesi

Dunstan 'ın çalışmasından elde edilen bulgular sülfata dayanıklı beton için uçucu kül seçimi bakımından aşağıdaki şekilde özetlenebilir :

| <u>Limit R Değerleri*</u> | <u>Sülfata Dayanıklılık**</u>   |
|---------------------------|---------------------------------|
| < 0.75                    | Büyük ölçüde artar              |
| 0.75 - 1.5                | Orta derecede artar             |
| 1.5 - 3.0                 | Önemli bir değişiklik gözlenmez |
| >3                        | Azalıır                         |

\*%25 ikame oranında

\*\*0.45 su/çimento oranında ASTM Tip II çimentosu ile kıyaslanmıştır.

Erdoğan ve arkadaşları (1992) Dunstan 'dan farklı olarak sülfata dayanıklılığı ölçmek için  $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$  oranının sülfat rezistans faktöründen daha uygun bir ölçek olduğunu ileri sürmüşlerdir. Freeman ve Carrasquillo (1992) uçucu küllü çimento kullanmanın sülfata dayanıklılık açısından uçucu külün betona karıştırma sırasında katılmasından daha faydalı olduğunu iddia etmişlerdir. Ayrıca uçucu kül ile üretilen betonların sülfata dayanıklılıklarının sadece Tip II çimentosu ile üretilenlerden daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Al-Amoudi ve arkadaşları (1992) mineral katkı betonların yüksek konsantrasyonlu sülfat ve klor içeren ortamlardaki davranışlarını incelemişler ve Tip I çimentosu ile uçucu kül karışımlarının en iyi sonuçlar verdiğini, silis dumanı ve cüruf içeren betonların yüzeylerinde ise daha çok hasar oluştuğunu gözlemişlerdir [14].

#### **2.2.6.8 Betondaki Alkali-Agrega Reaksiyonları Üzerinde Uçucu Külün Etkisi**

Bazı reaktif agregalar çimentodaki alkali ve hidroksil iyonları ile reaksiyona girerek genişleyen jel oluştururlar ve çimento hamurunun çatlamasına neden olurlar. Mineral katkı maddeleri genelde betonda alkali-agrega reaksiyonunu önleyici etkiye sahiptirler. Dunstan ve arkadaşları (1992) yüksek oranda uçucu kül içeren betonlarda 10 sene sonra dahi alkali-agrega reaksiyonu izlerine rastlanmadığını belirtmektedirler. Ohga ve Nagataki (1992) uygun uçucu kül oranı ile deniz ortamındaki betonda alkali-agrega reaksiyonunu kontrol etmenin mümkün olduğunu gözlemişler ve uçucu külün etkisinin çimentodaki alkali miktarına bağlı olduğunu saptamışlardır. Tyson (1992) alkali-agrega reaksiyonu sonucu hasara uğramış karayolu döşemesinin yenilenmesi amacıyla uçucu kül ve alkali miktarı düşük çimento kullanılmasının uygun olabileceği sonucuna varmıştır. Geiker ve Thaulow (1992) doymuş kalsiyum hidroksit ve sodyum klorür solüsyonları etkisine maruz harç çubuklarında 20 hafta boyunca

uzamaları ölçmüşler, uçucu kül ve sils dumanının alkali-agrega reaksiyonunu önlemede oldukça etkili olduğunu gözlemişlerdir. Beal ve Brantz (1992) yüksek fırın cürufu ,uçucu kül ve portland çimentosu ile üretilen 20 ve 40 Mpa mukavemetli betonlarda uçucu kül miktarının artışının boy uzamalarını azalttığı ve yüksek mukavemetlerde reaktivitenin daha az olduğu sonucuna varmışlardır [14].

Düşük kireçli uçucu küller %25-30 nispetinde çimento yerine kullanıldıkları takdirde alkali-silis reaksiyonlarının sebep olduğu genleşmeyi azalttıklarına dair bir çok güvenilir bilgi yayınlanmıştır [1].

Herhangi bir uçucu külün alkali-agrega reaksiyonuna bağlı genleşmeyi azaltıcı etkinliği beton numuneler kullanarak ASTM C441 ve C227 metodları ya da Kanada testi ( Can 3-A 23.5-M82 ) ile incelenebilir [9].

#### 2.2.6.9 Donatı Korozyonu Üzerinde Uçucu Külün Etkisi

Son yıllarda buz çözücü tuzlar ve deniz suyundan kaynaklanan klor iyonları nedeni ile donatı korozyonuna maruz yapılarda uçucu küllü beton kullanımı hususunda bir çok yayın yapılmıştır. Eğer beton çelik donatının üzerini yeterli kalınlıkla örtüyorsa ve beton geçirimsizse, o betonun kullanıldığı yapıda korozyona karşı gerekli önlemler alınmıştır denilebilir. Beton, fiziksel ve kimyasal tabiatı ile donatı için üç yönde koruyucu işlev görür [1]:

- Donatı yüzeyinin etrafında alkalın bir ortam meydana getirir.
- Rutubet, oksijen, karbondioksit, klor iyonları ve diğer agresif maddelere karşı fiziksel ve kimyasal bariyer vazifesi görür.
- Çelik donatı elemanları etrafında elektriksel etkilere karşı nispeten dirençli bir ortam sağlar.

Beton gibi alkalinitesi yüksek ( $\text{pH} \approx 12$ ) bir ortam, çelik yüzeyinde kararlı, koruyucu bir oksit tabakası oluşmasına yardımcı olur. Alkalın ortamda meydana gelen elektriksel direnci arttıran bu olaya passivasyon veya alkalın passivasyon denir. Dış ortamdan süzülen  $\text{Cl}^-$  iyonları (deniz suyu) veya diğer asit iyonları ( $\text{SO}_3^{2-}$ , endüstriyel kirli hava ) bu koruyucu tabakayı tahrip ederler yani depassivasyona sebep olurlar. Betonun alkalinitesi, hidrate olmuş çimentonun içerdiği  $\text{Ca(OH)}_2$  sayesinde sağlanır ; halbuki  $\text{Ca(OH)}_2$  zamanla havadaki  $\text{CO}_2$  ile birleşerek karbonatlaşır, nötürleşerek alkalinitesini kaybeder. Bir anlamda havaya açık betonarmelerde karbonatlaşma, passivasyon niteliğinin de kaybolması demektir [15]. Passivasyon niteliğini kaybetmiş ortamda yeterince oksijen ve rutubet metal yüzeye ulaştığında korozyon olayı meydana gelir.

Puzolanik reaksiyonlar neticesinde uçucu kül hidrate olmuş çimentonun boşluk suyundaki yüksek alkaliniteye sahip iyonları azaltarak ortamın ph değerini düşürür (Ho ve Lewis 1983). Buna karşın uygun şekilde oranlanmış ve kür edilmiş uçucu küllü betonlar ileri yaşlarda normal betonlara nazaran daha az geçirimli olmaktadır[9].

Dunstan ve arkadaşları (1992) yüksek oranda uçucu kül ile yapılmış deniz yapılarında 10 yıl sonra yapılan incelemelerde donatının iyi korunmuş olduğunu gözlemişlerdir. Nagataki ve Ohga (1992) uçucu kül içeren ve içermeyen harçlarda klor iyonu ve karbonatlaşmanın donatı korozyonuna ortak etkilerini incelemişler, su/çimento oranı 0.5 ve uçucu kül oranı %30 olan betonlarda NaCl kürünün karbonatlaşmayı azaltıcı etki yaptığını gözlemişlerdir. Branca ve arkadaşları (1992) su/çimento oranı 0.35, 0.50 ve 0.65 olan uçucu küllü betonlarda uçucu kül ilavesi ile karbonatlaşmanın azaldığı gözlenmiştir. Ancak uçucu kül çimento yerine kullanıldığında karbonatlaşmayı ve korozyon riskini arttırmaktadır. Carles-Gibergues ve Husson (1992) siliko-aluminöz uçucu küllü harçlarda karbonatlaşmanın daha erken başladığını belirtmektedirler [14].

#### 2.2.6.10 Uçucu Külün Deniz Suyuna Maruz Betonların Üzerindeki Etkisi

Deniz ortamına bağlı olarak meydana gelen beton hasarları kompleks bir konudur. Sülfat, magnezyum ve karbonik asit etkileri yanında NaCl 'ün kristalleşmesi sırasında meydana gelen çok yüksek basınç olayı da önemlidir. Bir yüzü ıslak diğer yüzü kuru olan, diğer bir deyişle hidrolik gradient altındaki iskele, rıhtım gibi beton yapılarda kristalleşme olayı hasara yol açar. NaCl 'ün kristalleşme sırasında oluşturduğu basınç 0 °C de 554 atmosfer, 50 °C de 654 atmosferdir. Beton boşluklarında oluşan bu iç basıncın hasara yol açması doğaldır. Deniz sularındaki sülfat ve magnezyum iyonlarının konsantrasyonu standartlarda belirtilen sakıncalı sınır değerlerinin çok üstündedir. Ancak deniz suları bazı özellikleri nedeni ile doğadaki diğer zararlı sular kadar tahribat yapmazlar. Agresifliği azaltan bu özellikleri iki ana noktada toplanmaktadır :

- 1- Tamamen su içinde kalan yapılarda Mg korozyonu nedeni ile ortaya çıkan brüsit ( $Mg(OH)_2$ ), yüzeyi tıkayarak sülfatların içeri nüfuz etmesini önler
- 2- Deniz suyundaki klor iyonları etrenjit ve jipsin çözünürlüğünü arttırırlar ve bu ögeler katı ortamda kristalleşmediklerinden zararlı genleşme yapmazlar. Nitekim deniz suyuna gömülü yapılarda genleşme, patlama sonucu oluşan sülfat etkisi gözlenmemiştir; etki yumuşama şeklindedir.

Tabii bu söylenenler su seviyesi değişen bölgeler için pek geçerli değildir. Sürekli ıslanıp kuruyan bu kısımlarda hasar oldukça şiddetlidir. Dalga hareketleri, sürüntü maddelerinin oluşturduğu erozyon, donma-çözülme, biyolojik korozyon ve alkali-agrega reaksiyonları hasarı ileri düzeye vardırır.

Deniz suyunun kimyasal korozyonuna karşı alınacak ilk pasif önlem, doğal olarak çimento türünün seçimi ile başlar. Sülfata dayanıklılıkta  $\text{Ca(OH)}_2$  miktarının kısıtlanması gerektiği düşünülürse hidrasyon sırasında ortaya çıkan  $\text{Ca(OH)}_2$  'i tespit eden puzolanik maddelerin yararlı olacakları anlaşılır. Bu bakımdan deniz suyuna maruz betonlar için puzolanik çimentolar tercih edilebilir. Denize dayanıklılıkta daima sülfat probleminin en etkin sorun olduğunu kabul etmenin gerçekçi olmadığını hatırlatmakta fayda vardır. Deniz suyuna dayanıklı varsayılan puzolanik çimentolar,  $\text{Mg}^{+2}$  korozyonu da düşünüldüğünde ve incelendiğinde, kireci bağladıkları için normal portland çimentolarına oranla daha sakıncalıdır [15].

Literatürde deniz suyunda uçucu küllü beton kullanımı hakkında fazla yayın yoktur. Dunstan ve arkadaşları (1992) yüksek oranlarda uçucu kül içeren beton ile yapılan deniz yapısının sürekli gel-git olaylarına maruz kalmasına rağmen gayet iyi performans gösterdiğini rapor etmektedirler. Paillere ve arkadaşları (1992) uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı harç numunelerini yapay deniz suyu içinde tutmuşlar ve uçucu küllü harçların cürufu harçlardan daha az şişme yaptığını gözlemişlerdir [14].

Son olarak deniz ortamından kaynaklanan durabilite problemleri ile karşılaşmanın ilk şartının boşluk oranı düşük ve geçirimsiz bir beton üretmek olduğunu hatırlatmakta yarar vardır.

### **2.2.7 Beton ile İlgili Bazı Özel Uygulamalarda Uçucu Külün Kullanımı**

Uygulamada uçucu külün kullanılıp kullanılmaması büyük ölçüde eldeki malzeme potansiyeline, lokal beton uygulama geleneklerine ve en önemlisi ekonomik faktörlere bağlıdır. Bununla birlikte aranan birtakım özellikleri kazanmak için uçucu kül ya da diğer mineral katkıların kullanımına ihtiyaç duyan bazı özel betonlar vardır. Yüksek mukavemetli beton uygulamalarının hemen hepsinde yüksek aktiviteli C-sınıfı uçucu küller ya da silis dumanı kullanılmış olup, bazılarında ise bu iki puzolan birlikte kullanılmıştır [2]. Rolkrit kütle betonlarının yapısal yeterliliği ve ekonomikliği de yine uçucu kül kullanımına bağlıdır.

#### **2.2.7.1 Yüksek Mukavemetli Beton**

Yüksek mukavemetli beton, binalardaki beton taşıyıcı elemanların boyutlarını en aza indirmek, prekast ve öngerilmeli beton endüstrisinde daha hızlı üretim döngüsü

sağlamak, büyük gerilmeler altındaki yüksek mukavemet ve elastisite modülü elde etmek gibi bir çok sebebe dayalı olarak uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Yüksek mukavemetli betonlar üç ana grupta toplanırlar :

- Bir çok yapı uygulamasında kullanılmış 35-70 MPa dayanım aralığındaki betonlar
- 70-100 MPa dayanım aralığındaki betonlar
- Basınç dayanımı 100 MPa 'ın ötesindeki betonlar

Yüksek dayanımlı beton üretiminde yoğun donatılı bir yapıda betonu yerleştirmeyi mümkün kılabilmek için yeterince işlenebilir, düşük su/çimento oranlı karışımlar gerekmektedir. Bu icapları karşılamak açısından aşağıda sözü geçen yaklaşımlar önemle dikkate alınmalıdır :

- Betonun tüm malzemelerini büyük titizlikle seçmek ve sıkı bir kalite kontrol programı uygulayarak başarısızlığı engellemek
- Su azaltıcı maddeler ve süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile sağlanabilen düşük su/çimento oranları seçmek
- Pozolan ve özellikle nitelikli uçucu kül kullanmak

Yüksek dayanımlı betonda kullanılan uçucu kül en az iki işlevi yerine getirir :

- İyi kalitede bir uçucu kül betonun su ihtiyacını azaltarak işlenebilirliği artırır, boşluk sistemini iyileştirir ve hidrasyon ısını azaltır.
- Uçucu kül pozolanik reaksiyonlara bağlı olarak kürün devam ettiği ileriki yaşlarda salt çimento ile ulaşılamayacak yüksek mukavemet değerleri sağlar.

Chicago civarında 62 MPa ve daha yüksek mukavemetli betonlar yaygın olarak bina inşaatlarında kullanılmaktadır. 1970 'li yıllarda Chicago 'da inşaa edilmiş iki yapıda kullanılmış olan yüksek dayanımlı betonların tipik karışım oranları Tablo 2.7 de örnek olarak verilmiştir [1].

Yüksek miktarda CaO içeren C-Sınıfı uçucu küller ile ilk yaşlardaki mukavemetleri de artırmak ve oldukça yüksek nihai mukavemetler elde etmek mümkündür [2]. Nitelikli uçucu küllerin süperakışkanlaştırıcılar ile kullanımıyla şantiyede yerleştirilebilir kıvamda ve yüksek mukavemetli betonlar ( $f_c > 65$  MPa) üretilmesi yolunda çığır açılmıştır.

**Tablo 2.7** Taze yüksek mukavemetli betonların karışım oranları ve özellikleri

| Malzeme                            | Miktar/m <sup>3</sup> |             |
|------------------------------------|-----------------------|-------------|
|                                    | Water Tower<br>Place  | River Plaza |
| Çimento (kg)                       | 383.7                 | 385.6       |
| İnce agrega (kg)                   | 464.9                 | 471.7       |
| İri agrega (kg)                    | 816.5                 | 784.7       |
| Su (kg)                            | 136.1                 | 149.7       |
| Su azaltıcı katkı (ml)             | 751.1                 | 1271.5      |
| Uçucu kül (kg)                     | 45.4                  | 45.4        |
| Çökme (mm)                         | 114.3                 | 114.3       |
| Hava içeriği (%)                   |                       | 1.5         |
| Birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | 2433.4                | 2383.8      |

#### 2.2.7.2 Silindirle Sıkıştırılmış Beton (Rolkrit)

1970 'li yıllarda baraj inşaatları için geliştirilmiş olan metodun "roller compaction", bu metotta kullanılan betonun ise "roller compacted concrete" ( RCC, silindirle sıkıştırılmış beton ) olarak adlandırılması önerilmiştir. Metod bir çok yönden geleneksel beton uygulamalarından çok geoteknik mühendisliğinde kullanılan prosedürlerle ilgilidir. Amerikan Beton Enstitüsü rolkriti, titreşimli silindirler kullanarak yapılan harici vibrasyon ile konsolide edilmiş kuru beton malzeme olarak tarif eder. Hedeflenen konsolidasyona ulaşmak için rolkrit, yerleştirme ekipmanının ağırlığını kaldıracak kadar kuru, karıştırma ve kompaksiyon boyunca hamur fazın tüm kütleyle üniform dağılabilmesi için de yeterince akıcı olmalıdır. Rolkritler aşağıdaki dört koşulu yerine getirmelidir [1] :

- Minimum hava boşluğu ile yüksek yoğunluğa sahip olmalıdırlar.
- Beton tabakalar arasındaki aderansı sağlamalıdırlar.
- Barajda açığa çıkan ısıyı en aza indirmelidirler.
- Sertleşmiş halde termal çatlaklara yol açan çekme gerilmelerini karşılayabilecek performansa sahip olmalıdırlar.

Ağırlık betonlarında betonun basınç dayanımı önem taşımaz; yapının güvenlik açısından iki önemli niteliği devrilme ve kaymaya karşı stabilitesidir. Çoğunlukla bir yıllık basınç dayanımının 13 MPa mertebesinde olması yeterlidir. Rolkritlerde bu dayanım rahatlıkla aşılmakta, hatta 30 MPa değerlerine bile varılabilmektedir [16].

Rolkritler için üç tip malzeme incelenmiş ve kullanılmıştır [1] :

- Çimento ile stabilize edilmiş zemin materyalleri
- Bağlayıcı dozajı 100 ila 150 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen ve bağlayıcı miktarının %30'u yerine uçucu kül kullanılabilen düşük dozajlı betonlar
- Bağlayıcı dozajı 180 ila 270 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen ve bağlayıcı miktarının %60-80 'i yerine uçucu kül kullanılabilen yüksek hamur içerikli ( High Paste Content RCC ) zengin betonlar.

Rolkritlerde uçucu külün esas fonksiyonu ince malzeme hacmini genişletip, daha iri tanelerin arasındaki boşluğu doldurmaktır. Aksi takdirde bu gereklilik ilave çimento ile sağlanacaktır. Rolkritin normal olarak yüksek hamur içeriğine gereksinimi vardır. Dunstan 'a göre (1982) hamur/harç oranı 0.35 ila 0.38 'in altına düştüğünde sıkıştırılmış kütleinin yoğunluğu önemli ölçüde azalmaktadır. Bu düzeyin altındaki hamur içeriğinde ince agregadaki boşlukların tümü dolmamaktadır. Maksimum yoğunluğu elde etmek için hamur içeriği artırılmalıdır. Çözüme çimento ilave edilerek gidildiği takdirde çimento iki dezavantajın ortaya çıkmasına sebep olacaktır :

- Sıcaklık yükselme nispeti artar, buna paralel olarak termal çatlama olasılığı yükselmiş olur.
- Beton maliyeti ekonomik olmayabilir.

Maksimum yoğunlukta rolkrit elde etmek için tercih edilen en akılcı yaklaşım hamur içeriğini artırmak maksadıyla büyük hacimlerde uçucu kül kullanmaktır. Amerikan Beton Enstitüsü tarafından yayınlanmış tipik rolkrit karışım oranları Tablo 2.8 de gösterilmiştir [1].

**Tablo 2.8 Bazı Rolkritler için Karışım Oranları**

| Kaynak | Maksimum<br>agrega boyutu<br>(cm) | Karışım dataları (kg/m <sup>3</sup> ) |         |     |                |               |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|---------|-----|----------------|---------------|
|        |                                   | Çimento                               | Puzolan | Su  | İnce<br>agrega | İri<br>agrega |
| 1      | 7.6                               | 56                                    | 77      | 77  | 60             | 1649          |
| 2      | 11.4                              | 139                                   | 0       | 80  | 618            | 1774          |
| 3      | 7.6                               | 139                                   | 0       | 86  | 683            | 1691          |
| 4      | 7.6                               | 139                                   | 0       | 83  | 676            | 1602          |
| 5      | 7.6                               | 42                                    | 78      | 83  | 676            | 1602          |
| 6      | 3.8                               | 75                                    | 164     | 89  | 745            | 1426          |
| 7      | 3.8                               | 45                                    | 178     | 84  | 727            | 1438          |
| 8      | 3.8                               | 116                                   | 139     | 103 | 657            | 1438          |

Rolkritlerde F-tipi yani düşük kireçli uçucu küller tercih edilmektedir. Bununla birlikte artık C-tipi uçucu küller de kullanılmaya başlanmıştır. 1992 yılı verilerine göre inşaatı tamamlanmış 49 adet RCC barajından 42 'sinde F-tipi uçucu kül kullanılmıştır. C tipi uçucu kül ise Stacy (USA) ve Willow Creek barajlarında kullanılmıştır. Günümüzde Yunanistan 'da Selaniğin kuzeyinde Platanovryssi bölgesinde 100 m yüksekliğinde inşa edilmekte olan barajda Ptolemaida 'da çıkan 350 km mesafeden getirilen yüksek kireçli ve sülfatlı uçucu kül kullanılmaktadır. Uçucu kül inşaat alanında inşaat alanında kurulan değirmenlerde öğütülmektedir. Külün %65 'i 43  $\mu$ m eleğin üstünde kalmakta, özgül yüzey 400 m<sup>2</sup>/kg değerine varmaktadır. Rolkritte karışım oranları ise 35 kg/m<sup>3</sup> portland çimentosu ve 250 kg/m<sup>3</sup> uçucu kül olarak tasarlanmıştır, yani bağlayıcıdaki uçucu kül oranı %88 'dir. 1976 'dan beri yapılan araştırmalar sonunda inşaat aşamasına geçilmiştir [16].

Oliverson ve Richardson (1984) rolkrit betonun donma ve çözülme durabilitesi hakkında yeni araştırmalar yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Gerçekten bazı uçucu küllerin betonun donma-çözülme durabilitesi için handikap oldukları düşünüldüğünde eğer rolkritin Kanada 'daki yol betonlarının maruz kaldığı gibi iklimsel koşullarda kullanılması söz konusu ise kullanılan uçucu küle bağlı olarak rolkritin donma-çözülme direnci kapsamlı olarak incelenmelidir [1,s 71].

### 2.2.7.3 Hazır Beton

Uçucu külün öncelikle teknik yönden faydalarının keşfedilmesi ve bunu takiben çimento sektörünü direkt olarak etkilemiş olan yetmişli yıllarda bir kaç kez yaşanan enerji krizleri dünya genelinde bu ekonomik malzemenin hazır beton endüstrisine girmesine sebep olmuştur. Bununla birlikte yüksek dayanımlı ve çok yüksek dayanımlı beton kullanımındaki talep artışı bu endüstrinin uçucu küle daha çok ihtiyaç duymasını sağlamıştır.

Dünyada bir çok hazır beton üreticisi uçucu külü granülometrisi bozuk agregaları iyileştirmek ya da pompa betonu için özel olarak oranlanmış karışımlar geliştirmek için kullanmaktadır. Buna karşın uçucu küllerin fiziksel, kimyasal ve minerolojik özellikleri standartlardaki belirli limitler içinde olması gereklidir. Kontrolsüzce kullanımın yarardan çok zarar getireceği muhakkaktır.

Bir termik santraldan uçucu kül temin edilmeden en az altı ay önce ilgili kimyasal ve fiziksel testlere başlanmalıdır. Uçucu külün lineerliği yakalandıktan sonra da aylık periyodlarla uçucu külün standartına uygunluğunun tespiti ve kalite lineerliğinin sağlandığının görülmesi gerekir. Bu amaç ile;

- 1- Termik santralin bir kalite güvenlik sisteminin olup olmadığı

- 2- Kullanılan hammadde kaynakları
- 3- Toplama sistemi
- 4- Termik santralın operasyon teknikleri , araştırılmalıdır.

Standartına uygunluğu, lineer olarak sağlanan uçucu külün betonda denenerek uygun kullanma miktarının tespiti işlemine geçilir. Uçucu külün ortalama özellikleri bilindikten sonra betonda kullanım oranı tespit edilerek beton santralına göre uçucu külün taşıma, stoklama ve sisteme karıştırılması projelendirilir. Uçucu külün beton santralında kullanımında ;

- 1- Uçucu külün birim ağırlığına bağlı olarak nakliyenin getireceği maliyet
- 2- Seçilecek silo tipi
- 3- Taşıma sistemi
- 4- Çimento ile uçucu külün karışmadan sisteme girmesi

konuları önem arz etmektedir [17].

Danimarka, Honk Kong, İtalya, Meksika ve Hollanda gibi ülkeler ürettikleri uçucu külün %80 'inden fazlasını inşaat endüstrisinde kullanma olanağı sağlarken, yılda 15 milyon ton mertebesinde uçucu kül üreten Türkiye 'nin inşaat endüstrisinde uçucu kül kullanım miktarı sıfır olarak yer almaktadır . Türkiye 'deki çimento üretiminin yılda toplam 25 milyon mertebesinde yer aldığı göz önünde tutulduğunda, yılda 15 milyon ton kül üretiminin çok büyük bir miktar olduğu daha iyi anlaşılmaktadır [4]. Bu sebeple uçucu küllerin Türkiye 'nin hazır beton sektörü içinde yerini alması kaçınılmaz olacaktır. Büyük bir hızla gelişmekte ve yaygınlaşmakta olan hazır beton sektörü, en azından büyük firmaları ile ekonomik ve teknolojik açılardan mineral katkı kullanılabilecek düzeye gelmiş görülmektedir. Hazır beton sektörünün bu potansiyeli değerlendirme zamanı gelmiştir [18].

#### **2.2.7.4 Hafif Agrega ve Hafif Beton Üretimi**

Uçucu küller 1100-1200 °C sıcaklıkta bir miktar ergime göstererek ve uygulanan sertleşme yöntemine bağlı olarak yuvarlak veya silindirik taneli agregalar oluşturulmaktadır. Doğal agregaya oranla daha hafif olan bu agregaların kullanılması ile hafif beton bloklar ve yapıda, hafif beton elde edilmektedir. Bu şekilde yapılan betonlar normal ağırlıklı betonlar kadar yüksek dayanıma sahip olmaktadır. Bunun yanı sıra hafiflik nedeni ile yapılarda işçilik kolaylaşmakta, ısı ve ses iletkenliği düşük özellikte malzeme elde edilebilmektedir. Elde edilen betonların (havada kurutulmuş)

yoğunluğu 1100-1800 kg/m<sup>3</sup> mertebesinde. Uçucu küllerden elde edilen iyi kalitedeki hafif agregalarla yapılan betonların 28 günlük basınç dayanımları yaklaşık 450 kg/cm<sup>2</sup> mertebesinde olabilmektedir [4].

Hwang ve arkadaşları (1992) F-tipi uçucu külden hafifagrega üretimini incelemişlerdir. Üretim sırasında çimento, kireç, alçı ve alüminyum tozu kullanılmış ve hızlandırılmış kür uygulanmıştır. Yazarlar peletleme hızının tablanın eğimine, dönme hızına ve süresine ve katkı ilave yöntemlerine bağlı olduğunu, alüminyum tozunun birim ağırlığı azaltıp, mukavemeti yükselttiğini ve kür sıcaklığının artışının mukavemet artışına neden olduğunu gözlemişlerdir. Yamashita ve arkadaşları (1992) özel bir fırın kullanarak uçucu külden hafif agrega üretiminde optimum sinterleme sıcaklığını saptamışlardır. Kuru özgül ağırlığı 1.40 civarında olan uçucu kül hafif agregasının su emme değeri %25 mertebesinde olmaktadır. Yazarlar bu agrega ile birim ağırlığı 1810 kg/m<sup>3</sup> olan hafif beton üretilebildiği ve 0.25 su-çimento oranında betonda 65 Mpa basınç mukavemeti elde edilebildiğini belirtmektedirler [14].

Uçucu kül gibi endüstriyel atıkların hafif agregaya dönüştürülerek inşaat sektörüne sunulması bir çok yarar sağlayacaktır [21]:

- Bu atıkların çevreyi kirletmesi önlenecektir.
- Daha az doğal agrega tüketileceği için çevre korunacaktır.
- Enerji tasarrufu sağlanacaktır.
- Üretilen malzemenin kullanılması çeşitli yapı türlerinde ekonomi sağlayacağı için mühendis ve müteahhitlere tanıtılması durumunda özellikle tercih edilecektir.

Böyle bir alanda yatırım yapılmadan önce yapılması gereken bir takım çalışmalar vardır:

- Konu edilen endüstriyel atıkların yıllık üretim miktarları tespit edilerek düzenli bir şekilde yayınlanmalıdır.
- Uçucu kül için kullanılabilir durumdaki mevcut rezervlerin hacmi belirlenmelidir.
- Üretim konusunda üniversitelerimizde deneysel çalışmalar yapılması sağlanmalıdır.
- Kapsamlı fizibilite raporları hazırlanmalıdır.
- İlgili yönetmelikler daha kapsamlı hale getirilmelidir.
- Taşıyıcı hafif agregalar ve avantajları inşaat sektörüne tanıtılmalıdır.

### 2.2.7.5 Diğer Kullanım Alanları

Yukarıda belirtilenlere ek olarak uçucu küllerin kullanıldıkları önemli alanların bazılarını aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür [4]:

- Portland çimentosu üretiminde hammadde olarak
- Tuğla üretiminde
- Gaz beton üretiminde
- Harç yapımında
- Maden ocaklarında filler olarak
- Yalıtım malzemesi olarak

Bu kadar geniş uygulama alanına hitab eden bu ekonomik malzemenin ülkemiz inşaat sektöründe gerektiğince kullanılmaması temelde aşağıdaki nedenlere dayanır:

- Sektörün nispeten tutucu karakterinden kaynaklanan yeni yöntem ve malzemelere karşı duyulan şüphe.
- Türkiye uçucu küllerinin özellikleri ve yapı malzemesi olarak kullanılabilirlikleri hakkında gerek üreticinin (TEK), gerekse tüketici potansiyalinin yeterli bilgi birikimine sahip olmaması.
- Aynı kaynaktan elde edilmiş uçucu küllerin bile özelliklerinin değişkenlik göstermesi.
- Çimento sektörünün pazar kaygısı.
- Özellikle Batı Anadolu linyitlerindeki radyoaktivitenin varlığından bahsedilmesi.
- Sektörün üniversitelere yeterli desteği vermeyişi ve sanayi ile üniversite arasındaki diyalog kopukluğu.

## BÖLÜM 3

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

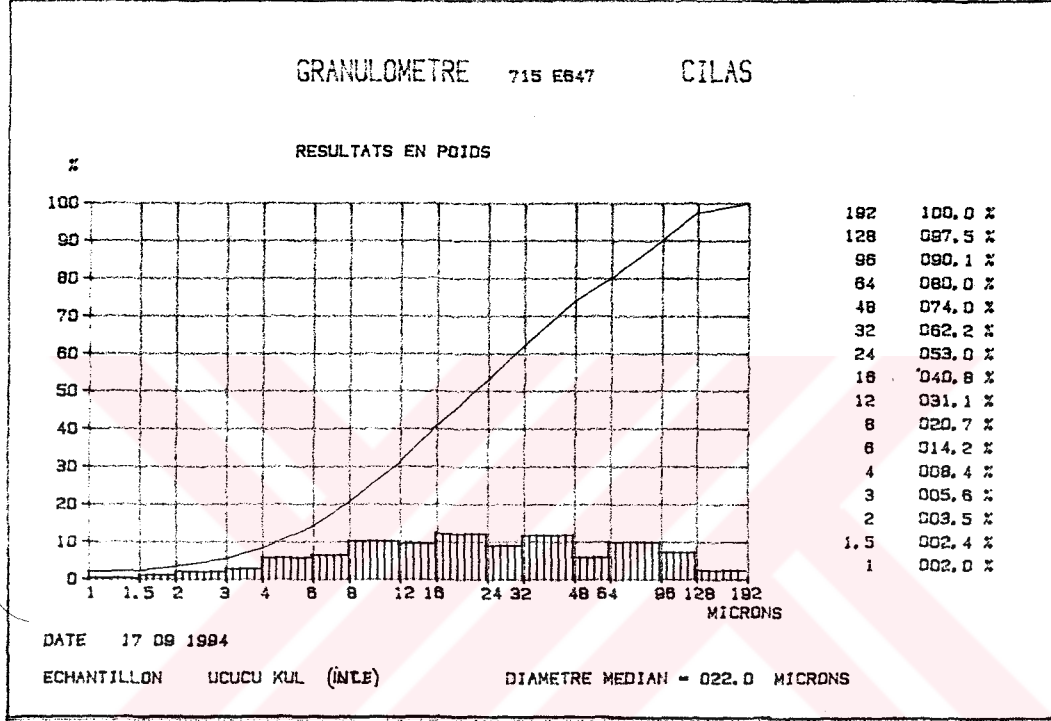
#### 3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1 Seyitömer Termik Santral Uçucu Külü ve Özellikleri

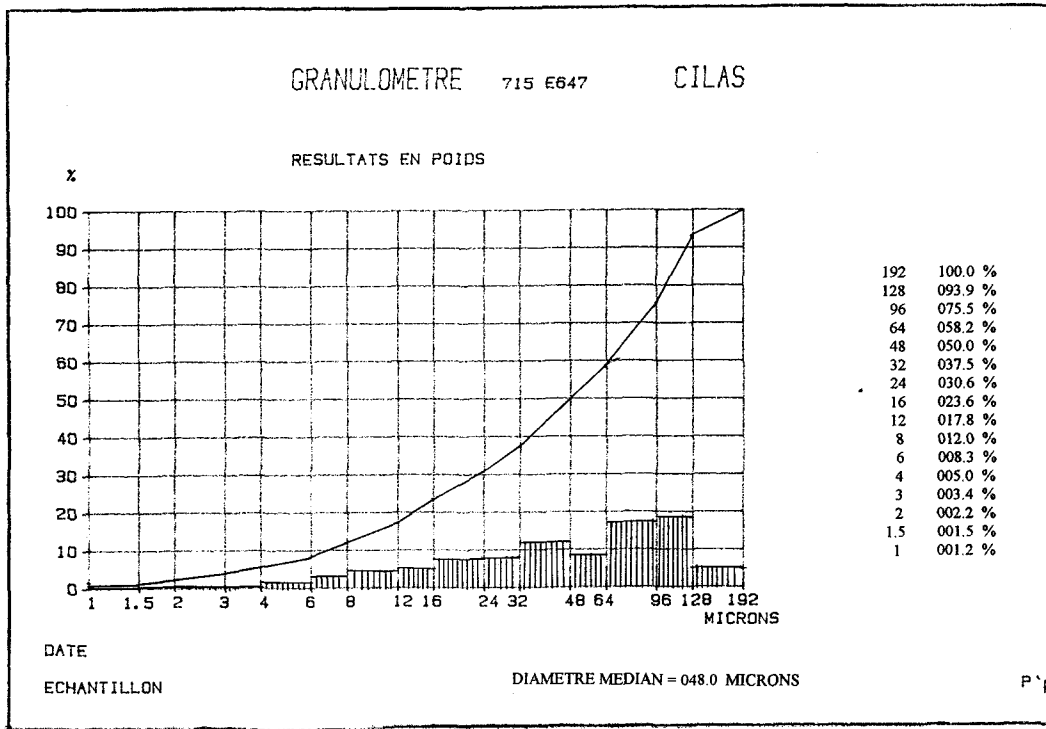
Araştırmada kullanılan uçucu küller Seyitömer termik santralından elde edilmiştir. Deneysel sonuçları etkileyebilecek faktörleri en aza indirmek maksadıyla uçucu kül numuneleri Seyitömer 'e gidilerek yerinden temin edilmiştir.

Termik santralin yanma kamarasında brülörden püskürtülerek yakılan kömürün külü ya büyük parçacıklar halinde aşağıya çökmekte ya da ince parçacıklar halinde yanma gazlarıyla sürüklenerek elektrofiltrelere gelmektedir. Uçucu kül önce ön filtre olarak adlandırılan I nolu filtreden geçmektedir. I nolu filtrede tutulamayan ve sürüklenmeye devam eden kül parçacıkları II nolu filtrede bloke edilmektedir. Bu son kademede tutulan küller elektrofiltre bunkerlerinde biriktirilmektedir. Farklı inceliklerde uçucu kül numuneleri elde etmek amacıyla öncelikle bunkerlerde hazır olarak bulunan II nolu filtrede tutulmuş ince uçucu kül temin edilmiştir. Daha iri numune elde etmek için I nolu ön filtrede tutulan kül parçacıkları hat üzerindeki bir tahliye vanası vasıtası ile dışarıya tahliye edilmiştir. Böylece farklı tane boyutu dağılımına sahip iki grup numune elde edilmiştir. Laboratuvarında yapılan analizlerde iri gruba ait tanelerin 1 mm den daha küçük çapta olduğu saptanmıştır. İriliği makul bir sınıra çekmek amacıyla iri küller 250µm 'lik elekten elenmişlerdir. Böylece çalışmada elek altına geçen kısım kullanılmıştır. Akçimento laboratuvarında yaş yöntemle yapılan granülometri analizinde elek altı uçucu kül numunesinin %100 'ünün 192µm 'nin altında olduğu sonucu çıkmıştır. Erol Özbek, elek analizi yapılırken kuru tanelerin birbirine yapışık olabileceğine bağlı olarak yaş analize göre tanelerin daha iri görünmesinin normal olduğunu ifade etmiştir. Granülometriyi belirleyen cihaz iri uçucu kül için median değerini 81.7µm olarak tayin etmiştir. Yani iri uçucu küle ait numunedeki taneciklerin %50 'si 81.7µm

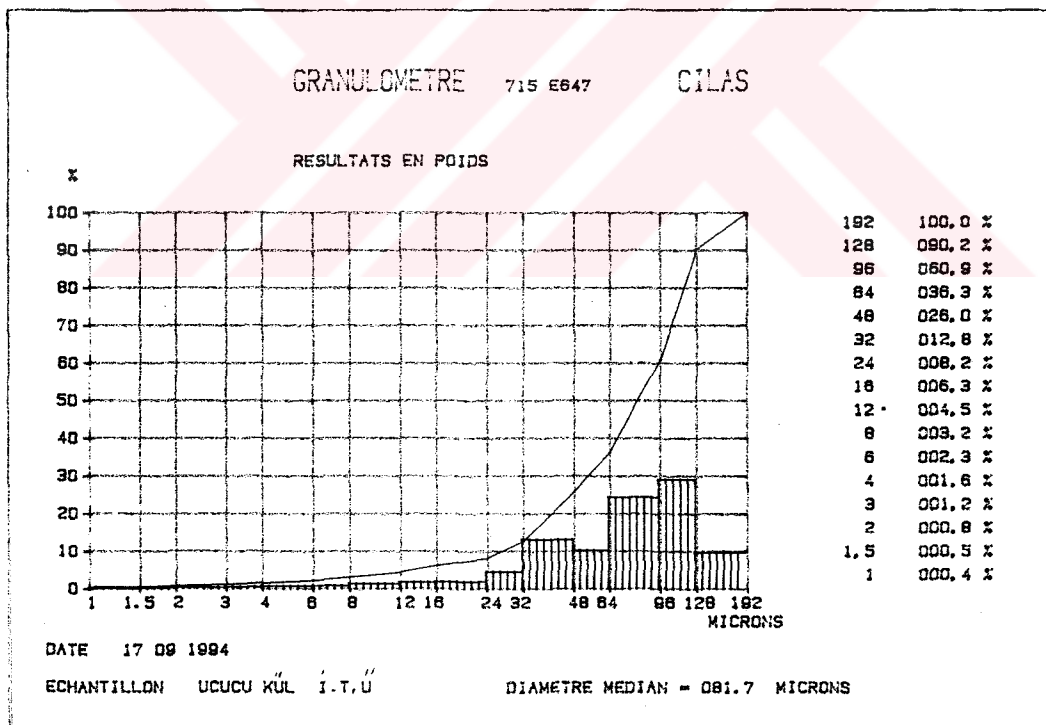
'den daha incedir. Üçüncü bir grup uçucu külde ince ile iri külün bire bir oranda karıştırılması ile elde edilmiştir. İri kül ince kül ile karıştırılınca orta incelikteki kül için median değeri  $48\mu\text{m}$ 'ye düşmüştür. İnce uçucu külün median değeri ise  $22\mu\text{m}$ 'dir. Tane boyutu dağılımlarına göre sınıflandırılmış uçucu kül gruplarına ait granülometrik eğrileri ve yüzdeleri içeren veriler Şekil 3.1 , Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 İnce Uçucu Kül'e ait Granülometrik Analiz



Şekil 3.2 Orta İncelikteki Uçucu Küle ait Granülometrik Analiz



Şekil 3.3 İri Uçucu Küle ait Granülometrik Analiz

Görünüş olarak ince uçucu kül ( II nolu filtrede tutulan) açık kahve rengindedir. İri uçucu külün rengi ise daha koyudur. Rengin daha koyu olmasında iri külün içinde yanmamış kömür parçacıklarının olmasının etkisi vardır.

Uçucu kül numunelerinin özgül ağırlık değerleri Aslan Çimento fabrikası laboratuvarlarında ölçülmüştür. Özgül ağırlık ince uçucu kül için  $1.89 \text{ gr/cm}^3$ , orta incelikteki uçucu kül için  $1.69 \text{ gr/cm}^3$ , iri uçucu kül için  $1.51 \text{ gr/cm}^3$  değerini almıştır. Önceki yapılan çalışmalar da uçucu külün irileştikçe özgül ağırlığın azaldığını göstermektedir. Bu azalmanın temel sebepleri iri tanelerin poroz yapıları ve iriliğe bağlı olarak değişen kimyasal kompozisyon gibi faktörlere dayandırılabilir. Tokyay'ın yaptığı araştırmada (6) bu çalışmada ince olarak tabir edilen Seyitömer uçucu külünün özgül ağırlığı  $2.46 \text{ gr/cm}^3$  olarak verilmiştir. Öztekin ve Kurbetçi (19) ise yayınladıkları çalışmalarında Seyitömer uçucu külünün özgül ağırlığını  $2.13 \text{ gr/cm}^3$  olarak saptadıkları görülmektedir. Açıkça görülmektedir ki aynı kaynaktan farklı zamanlarda alınan uçucu kül numunelerinin özgül ağırlıkları arasında dikkat çekici farklılıklar vardır. Bu farklılıklar göz önüne alındığında uçucu külü betonda ilave bir bileşen olarak kullanmanın çok sıkı bir kontrol mekanizmasını gerektirdiği ortadadır. Bir termik santralin bünyesinde birden fazla yanma ünitesi olması sebebiyle farklı ünitelerden çıkan uçucu küllerin bazı özelliklerinin değişebileceği ihtimali akla gelmektedir. Bu çalışmaya ait verilerin ışığında, aynı kömür kaynağının kullanılıyor olmasına rağmen eğer ünitelerin teknolojik performanslarına bağlı olarak biriktirdikleri uçucu küllerin incelikleri değişkenlik gösteriyorsa bir termik santraldan farklı özgül ağırlıklara sahip numuneler elde etmek gayet doğaldır.

Uçucu kül numunelerinin kimyasal kompozisyonlarının analizi de yine Aslan Çimento fabrikasında yapılmıştır. Kimyasal kompozisyonlar ile ilgili veriler Tablo 3.1 de gösterilmiştir. Kimyasal kompozisyon açısından çalışmada kullanılan uçucu küllerin TS 639 kriterlerine uygun olduğunu söylemek pek yanlış olmaz. Ancak burada da CaO yüzdesine bağlı olarak ilgi çekici sonuçlar elde edilmiştir. Akman'ın yaptığı çalışmada (16) Seyitömer uçucu külü için CaO yüzdesi 12.3, Tokyay'ın yaptığı çalışmada ise (6) CaO yüzdesi 19.9 olarak verilmiştir. Bu iki çalışmada CaO yüzdeleri arasında bariz farklılık görünmekle birlikte her iki uçucu külde yüksek kireçli uçucu kül sınıfına girmektedir. Bu çalışmada kullanılan numuneler ise CaO yönünden düşük kireçli uçucu kül sınıfının alt sınırlarında yüksek kireçli uçucu kül sınıfına yakın değerlere sahiptir. CaO gibi dayanım gelişimi hızını büyük ölçüde etkileyen bir oksitin

kimyasal kompozisyondaki yüzdesi, aynı termik santrale ait uçucu kül numunelerinde bu denli farklılık göstermesi dikkat edilmesi gereken diğer bir husustur.

**Tablo 3.1** Uçucu Kül Numunelerinin Kimyasal Kompozisyonları

| Oksit (%)                      | İnce  | Orta  | İri   | TS 639 Sınırları |
|--------------------------------|-------|-------|-------|------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 48.13 | 50.75 | 53.37 | -                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.64 | 15.10 | 15.55 | -                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 12.13 | 12.92 | 13.70 | -                |
| S+A+F                          | 74.90 | 78.76 | 82.62 | >70              |
| CaO                            | 9.52  | 8.67  | 7.82  | -                |
| MgO                            | 5.70  | 5.11  | 4.52  | <5               |
| SO <sub>3</sub>                | 4.32  | 2.44  | 0.56  | <5               |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.50  | 0.47  | 0.44  |                  |
| K <sub>2</sub> O               | 2.00  | 1.69  | 1.38  |                  |
| Kızdıma Kaybı                  | 2.36  | 2.85  | 3.33  | <10              |

### **Puzolanik Aktivite**

Çalışmada kullanılan farklı tane boyu dağılımlarına sahip uçucu küllerin puzolanik aktiviteleri TS 639 'da öngörülen şekilde yapılmıştır. PÇ-325 'e uygun portland çimentosu ile hazırlanan karşılaştırma numuneleri ile uçucu kül+çimento karışımından yapılmış harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları kıyaslanmıştır. Tablo 3.2 de üç uçucu kül grubu için çimento+kül karışımı numunelerinin ortalama basınç dayanımının karşılaştırma ( yalnız çimento ) numunelerinin ortalama basınç dayanımına oranı olarak ifade edilen puzolanik aktivite indeksleri verilmiştir. TS 639'a göre puzolanik aktivite indeksinin en az kontrolün %70 'i olması gerekmektedir. Tablo 3.2 de görüldüğü gibi uçucu küllerin TS 639'daki test yöntemi ile puzolanik aktivitelerinin oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bu sürpriz bir sonuç olmamıştır. Deney numunelerinin üretimi esnasında uçucu kül irileştikçe artan su ihtiyacı problemi gözlenmiştir. Kontrol numuneleri oldukça işlenebilir kıvamda üretilip rahatlıkla yerleştirilebilmişken uçucu küllü üretimler artan su ihtiyacına bağlı olarak kalıplara

gerektiği gibi yerleştirilememiştir. Kuru kıvamdaki harcın yerleştirici sarsma tablası üzerinde sıçramalar yaptığı gözlenmiştir. Bununla birlikte kıvamın çok kuru olması sebebiyle çimento taneleri topaklanmıştır. Kalıplar alındığında kontrol numunelerinin oldukça iyi yerleştiği, uçucu küllü numunelerin ise boşluklu bir görünümde olduğu gözlenmiştir. Uçu kül iriliği arttıkça bu boşluklar daha ciddi hal almıştır. Tokyay (6) ve Ramyar'ın (20) yaptıkları çalışmalarda Türkiye uçucu külleri hakkında verdikleri istatistiki bilgilere göre kontrol numunesinin yüzdesi olarak su ihtiyacı en fazla olan külün Seyitömer külü olduğu görülmektedir. Bu test metoduyla, bir uçucu külün minerolojik ve kimyasal kompozisyonu aktivite yönünden ne kadar zengin olursa olsun dayanım üzerinde su ihtiyacının belirleyici faktör olması durumunda bu zenginliğin önemi kalmamaktadır. Uçucu külün su ihtiyacı yönünden harçlarda gösterdiği davranış ile betonda gösterdiği davranışın birbirine paralellik göstermediği taze betonun su ihtiyacı ile ilgili bahiste daha net görülecektir. TS 639' daki aktivite deneyinin uçucu külün performansını değerlendirme yönüyle uygunluğunun tartışmaya açık olduğu ortadadır.

**Tablo 3.2** Çalışmada Kullanılan Uçucu Kül Gruplarının Pozolanik Aktivite İndeksleri

|                    | İnce | Orta | İri  | TS 639 Sınırı |
|--------------------|------|------|------|---------------|
| P.A.İ. (% Kontrol) | 42.3 | 29.6 | 19.1 | >70           |

### 3.1.2 Çimento

Çalışmada Akçimento'dan temin edilmiş olan PÇ-32.5 Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.3 de gösterilmiştir.

**Tablo 3.3** Çalışmada Kullanılan Çimentonun Kimyasal, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

| KİMYASAL ANALİZ<br>(CHEMICAL ANALYSIS)               |                           | Standartlar<br>(Standarts)<br>% | Analiz Sonuçları<br>(Result of Analysis)<br>% | FİZİKSEL DENEMELER<br>(PHYSICAL TESTS)                                                               |                                             | Standartlar<br>(Standarts)                          | Analiz Sonuçları<br>(Result of tests) |
|------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                                     | Çözünmeyen<br>(Insoluble) |                                 | 0.65                                          | Özgül ağırlık gr/cm <sup>3</sup><br>(Specific weight)                                                |                                             |                                                     | 3.10                                  |
|                                                      | Çözünen<br>(Soluble)      |                                 | 21.21                                         | Donma Süresi<br>(Setting Time)<br><br>(Vicat)                                                        | Başlangıç<br>(initial)                      |                                                     | 2 <sup>10</sup>                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       |                           |                                 | 5.55                                          |                                                                                                      | Son<br>(Final)                              |                                                     | 3 <sup>10</sup>                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                       |                           |                                 | 3.31                                          | Hacim Sabitliği (Soudness)<br>(I.e Chatelier) mm.                                                    |                                             |                                                     | 2                                     |
| Ca O                                                 |                           |                                 | 64.16                                         | İncelik<br>(Fineness)                                                                                | Özgül Yüzey<br>(Blaine) cm <sup>2</sup> /g. |                                                     | 3239                                  |
| Mg O                                                 |                           |                                 | 1.15                                          |                                                                                                      | 900<br>(200 M) % elekte kalıntı             |                                                     | 0.1                                   |
| S O <sub>3</sub>                                     |                           |                                 | 2.66                                          |                                                                                                      | 4900<br>(90 M) % elekte kalıntı             |                                                     | 4.0                                   |
| Kızdırma Zayıflığı<br>(Loss on ignition)             |                           |                                 | 0.98                                          | DAYANIM DENEMELERİ<br>(STRENGTH TESTS)                                                               |                                             |                                                     |                                       |
| Öçülmeyen<br>(Rest)                                  |                           |                                 | 0.33                                          | Rilem - Cembureau metodu : 40 x 40 x 160 mm prizmalar<br>Karışım : 1 Çimento + 3 Kum + 0.5 su TS 819 |                                             |                                                     |                                       |
| <b>Toplam</b>                                        |                           |                                 | 100.00                                        |                                                                                                      |                                             |                                                     |                                       |
| Serbest (Ca O)<br>(Free Ca O)                        |                           |                                 | 1.13                                          | Eğilme dayanımı<br>(Flexure ) N/mm <sup>2</sup>                                                      |                                             | Basınç dayanımı<br>(Compressive ) N/mm <sup>2</sup> |                                       |
| Hidrolik Modül                                       |                           |                                 | 2.13                                          |                                                                                                      |                                             |                                                     |                                       |
| Silikat Modül                                        |                           |                                 | 2.33                                          | Gün<br>(Day)                                                                                         | Standart                                    | E.D. sonuç                                          |                                       |
| Alümin Modül                                         |                           |                                 | 1.68                                          |                                                                                                      |                                             |                                                     |                                       |
| Kireç Standartlı<br>(I.S.F)                          |                           |                                 | 91.50                                         |                                                                                                      |                                             |                                                     |                                       |
| Mineralojik Bileşimler<br>(Minerological components) | Δ K                       |                                 |                                               | 1                                                                                                    | 3.0                                         |                                                     | 9.8                                   |
|                                                      | C <sub>3</sub> S          |                                 | 45.73                                         | 2                                                                                                    | 5.2                                         |                                                     | 23.3                                  |
|                                                      | C <sub>2</sub> S          |                                 | 26.39                                         | 3                                                                                                    | 8.0                                         |                                                     | 25.7                                  |
|                                                      | C <sub>3</sub> A          |                                 | 9.11                                          | 7                                                                                                    | 8.4                                         |                                                     | 37.1                                  |
|                                                      | C <sub>4</sub> Af         |                                 | 10.07                                         | 28                                                                                                   | 8.9                                         |                                                     | 44.1                                  |

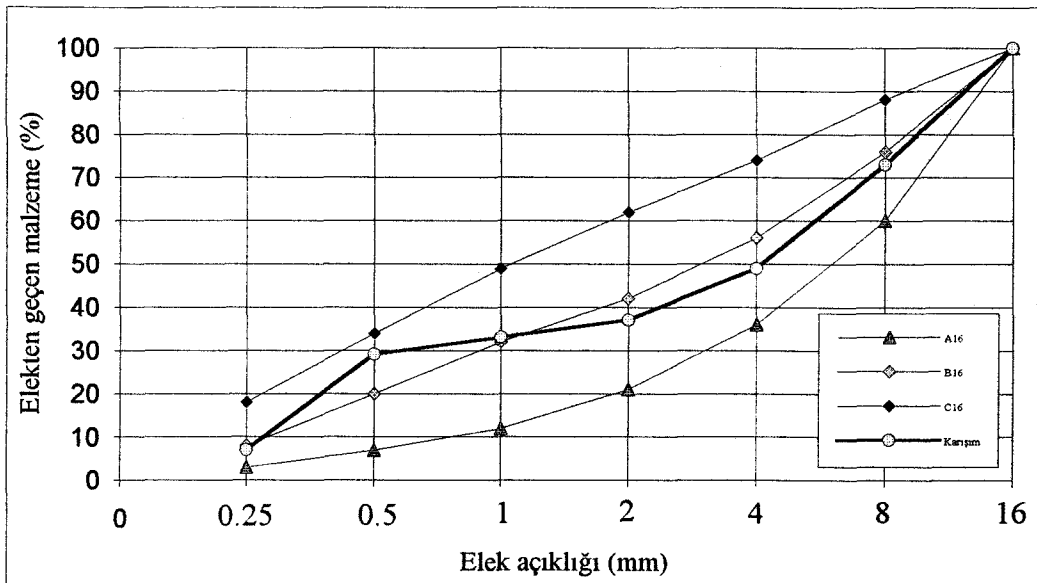
### 3.1.3 Agregalar

Çalışma boyunca agrega türü ve granülometrisi değişmemiştir. Maksimum tane çapı 16 mm olarak seçilmiştir. Kırmataş II, kırmataş I, kırma kum ve doğal deniz kumu olmak üzere toplam 4 çeşit agrega kullanılmıştır. Bu agregalara ait elek analizi sonuçları, özgül ağırlık ve gevşek birim ağırlık değerleri Tablo 3.4 de verilmiştir.

**Tablo 3.4** Agregalara ait elek analizi sonuçları, özgül ağırlık ve gevşek birim ağırlık değerleri

| Elek göz boyutları<br>(mm) | Elekten geçen malzeme (%) |     |     |    |    |     |      |                |
|----------------------------|---------------------------|-----|-----|----|----|-----|------|----------------|
|                            | 16                        | 8   | 4   | 2  | 1  | 0.5 | 0.25 | Ö.A.<br>(kg/t) |
| Kırmataş II                | 100                       | 19  | 5   | 3  | 2  | 2   | 1    | 2.66           |
| Kırmataş I                 | 100                       | 74  | 20  | 7  | 6  | 5   | 4    | 2.71           |
| Kırma kum                  | 100                       | 100 | 99  | 65 | 43 | 24  | 9    | 2.63           |
| D. kum                     | 100                       | 100 | 100 | 97 | 96 | 91  | 16   | 2.70           |

A<sub>16</sub>-B<sub>16</sub> referans eğrilerine bağlı olarak ideal granülometriye en yakın granülometriye sahip karışım kırmataş II 'den %20, kırmataş I'den %40, kırma kumdan %15 ve doğal kumdan %25 alarak elde edilmiştir. Şekil 3.4 de karışım agregasına ait granülometri eğrisinin A<sub>16</sub>-B<sub>16</sub>-C<sub>16</sub> referans granülometri eğrileri ile karşılaştırılması gösterilmiştir.



**Şekil 3.4** TS 707 Referans ve Karışım Granülometri Eğrileri

### 3.2 Üretilen Betonların Özellikleri

İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilen araştırmada biri kontrol (uçucu külsüz) seri, üçü ince uçucu kül içeren seri, üçü orta incelikte uçucu kül içeren seri, üçü de iri uçucu kül içeren seri olmak üzere toplam 10 seri beton üretilmiştir. Her incelikte %10, %20 ve %30 olmak üzere üç ayrı uçucu kül ikame oranı ile çalışılmıştır. Kontrol betonu için çimento dozajı ve uçucu küllü betonlar için toplam bağlayıcı miktarı  $300 \text{ kg/m}^3$  olarak seçilmiştir. Kimyasal katkının kullanılmadığı çalışmada agrega türü ve granülometrisi aynı kalmıştır. Agrega maksimum tane çapı 16 mm olarak seçilmiştir. Çimento ile yer değiştiren uçucu külün (ağırlıkça) çimentoya göre daha fazla hacim kaplaması sebebi ile bu hacim fazlalığı kum hacmi kısıtlanarak ortadan kaldırılmıştır. Betonların üretimi esnasında kıvam sabit tutularak  $12 \pm 0.5 \text{ cm}$  lik çökme değerinde çalışılmıştır. Üretilen her seri için miktarca 30 litre betona karşılık malzeme kullanılmıştır.

### 3.3 Taze Beton Deneyleri

Her serinin istenilen işlenebilirlik için su ihtiyacını tespit etmek amacıyla karıştırma esnasında su azar azar katılmış, hedeflenen çökme değerini aşmamak için çökme konisi deneyi gerektiğince tekrarlanmış ve bu deneye hedeflenen çökme değerine maksimum 0.5 cm toleransla ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Karışıma ihtiyacı olduğu suyu kattıktan sonra 8 litre ölçekli kapta taze beton ağırlığı ölçülerek taze beton birim ağırlığı hesaplanmıştır. Üretim esnasında elde edilen bu veriler ile karışımların gerçek bileşimleri hesaplanmıştır.

### 3.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$  boyutlarında prizmalar ile bu prizmalara ait parçalar üzerinde yapılmıştır. Taze betona ait ölçümler yapıldıktan sonra kalıplara yerleştirilen numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkartılmışlardır. Ancak çok soğuk havalarda özellikle %30 ikame oranında uçucu kül içeren serilerde bu süre 36-48 saati bulmuştur. Bir üretimde toplam 12 adet prizma numune elde edilmiştir. Bu

numunelerden 8'i kalıptan çıkartıldıktan sonra kirece doymun  $20 \pm 3$  ° C sıcaklıktaki sulu ortamda ıslak küre tabi tutulmuşlardır. Diğer 4 numune ise 20 ° C sıcaklıktaki odada deniz suyu içeren kapta saklanmışlardır. Bu 4 numune deniz suyunda bir hafta kaldıktan sonra aynı süreyle 20 ° C sıcaklıktaki odada hava koşullarında saklanmışlar, böylece iki hafta periyotlu bir ıslanma-kuruma çevrimi oluşturulmuş ve deneyler bu çevrim boyunca gerçekleştirilmiştir.

Standart koşullarda kür yapılmış prizma numuneler üzerinde 3, 7, 28 ve 91. günlerde eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. 28. ve 91. günlerde prizma parçaları üzerinde birim ağırlık, su emme ve kılcal su emme deneyleri yapılmıştır. 91. gün için saklanan prizma numunelerin 7, 28, 56 ve 91. günlerinde ultrases cihazı ile ses hızları ölçülmüş, dinamik elastisite modülleri saptanmıştır.

Deniz suyu ortamında ıslanma-kuruma çevrimine maruz prizma numuneler üzerinde sadece 28. ve 91. günlerde eğilme ve basınç deneyleri yapılmıştır. 91. gün için saklanan prizma numunelerinin 7, 28, 56 ve 91. günlerinde ultrases cihazı ile ses hızları ölçülmüştür.

### 3.5 Üretilen Serilere ait Karışım Hesapları

Referans granülometri eğrileri dikkate alınarak elde edilen agrega karışım oranları,  $300 \text{ kg/m}^3$  seçilen toplam bağlayıcı miktarı ve istenilen sabit işlenebilirlik için gerekli tahmini su miktarı değerlerine bağlı olarak her seri için  $1 \text{ m}^3$  'e giren teorik malzeme miktarları hesaplanmış, bu teorik hesaba göre üretilen 30 lt deneme betonunda gerekli ölçümler yapılmış ve gerçek bileşime ait değerler elde edilmiştir. Üretilen serilerin gerçek bileşimleri ve karışım oranları Tablo 3.5 de gösterilmiştir.

**Tablo 3.5** Üretilen Serilerin Gerçek Bileşimleri ( 1 m<sup>3</sup> betona giren malzemeler ) ve Karışım Oranları

| Seri no | Çimento |             | Uçucu Kül              |                    |             | Agrega      |            |           |            |             | Su   | S/Ç+UK |
|---------|---------|-------------|------------------------|--------------------|-------------|-------------|------------|-----------|------------|-------------|------|--------|
|         | Tipi    | Miktar (kg) | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Tane Boyutu Sınıfı | Miktar (kg) | D maks (mm) | Kt II (kg) | Kt I (kg) | K.Kum (kg) | D.Ku m (kg) | (kg) |        |
| 1       | PÇ-32.5 | 300         | 0                      | -                  | 0           | 16          | 359        | 721       | 273        | 443         | 228  | 0.76   |
| 2       | PÇ-32.5 | 270         | 10                     | İNCE               | 30          | 16          | 360        | 720       | 273        | 428         | 232  | 0.77   |
| 3       | PÇ-32.5 | 241         | 20                     | İNCE               | 60          | 16          | 358        | 719       | 273        | 409         | 232  | 0.77   |
| 4       | PÇ-32.5 | 210         | 30                     | İNCE               | 90          | 16          | 356        | 715       | 271        | 390         | 237  | 0.79   |
| 5       | PÇ-32.5 | 272         | 10                     | ORTA               | 30          | 16          | 358        | 719       | 273        | 421         | 232  | 0.77   |
| 6       | PÇ-32.5 | 240         | 20                     | ORTA               | 60          | 16          | 355        | 713       | 270        | 396         | 236  | 0.79   |
| 7       | PÇ-32.5 | 210         | 30                     | ORTA               | 90          | 16          | 352        | 709       | 270        | 373         | 244  | 0.81   |
| 8       | PÇ-32.5 | 272         | 10                     | İRF                | 30          | 16          | 358        | 720       | 273        | 414         | 232  | 0.77   |
| 9       | PÇ-32.5 | 239         | 20                     | İRF                | 60          | 16          | 350        | 704       | 267        | 375         | 241  | 0.81   |
| 10      | PÇ-32.5 | 211         | 30                     | İRF                | 90          | 16          | 352        | 707       | 266        | 345         | 251  | 0.83   |

## BÖLÜM 4

### DENEY SONUÇLARI

#### 4.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Üretilen serilerin taze beton özelliklerini veren deney sonuçları Tablo 4.1 de gösterilmiştir.

**Tablo 4.1** Taze Beton Deney Sonuçları ve Taze Beton Özellikleri

| Seri no | U. K. ikame yüzdesi (%) | Tane boyutu sınıfı | Çökme (cm) | Birim ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | Hava boşluğu (lt) | Kompasite (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) |
|---------|-------------------------|--------------------|------------|------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------|
| 1       | 0                       | -                  | 12         | 2324                               | 6                 | 0.762                                       |
| 2       | 10                      | İnce               | 11.5       | 2313                               | 1                 | 0.767                                       |
| 3       | 20                      | İnce               | 12         | 2292                               | 3                 | 0.765                                       |
| 4       | 30                      | İnce               | 12         | 2269                               | 2                 | 0.761                                       |
| 5       | 10                      | Orta               | 11.5       | 2305                               | 2                 | 0.766                                       |
| 6       | 20                      | Orta               | 11.5       | 2270                               | 5                 | 0.759                                       |
| 7       | 30                      | Orta               | 12         | 2248                               | 0                 | 0.756                                       |
| 8       | 10                      | İri                | 11.5       | 2299                               | 2                 | 0.766                                       |
| 9       | 20                      | İri                | 12.5       | 2236                               | 6                 | 0.749                                       |
| 10      | 30                      | İri                | 12         | 2222                               | 0                 | 0.737                                       |

#### 4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

##### 4.2.1 Basınç Dayanımı

Çalışılan deney serilerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 4.2 de gösterilmiştir.

**Tablo 4.2** Deney Serilerinden Elde Edilen Basınç Dayanımı Değerleri

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) |       |        |        |
|--------------------|------------------------|--------------------------------------|-------|--------|--------|
|                    |                        | 3 GÜN                                | 7 GÜN | 28 GÜN | 91 GÜN |
| -                  | 0                      | 14.9                                 | 22.0  | 32.2   | 35.3   |
| İnce               | 10                     | 12.9                                 | 19.1  | 31.4   | 35.6   |
| Orta               | 10                     | 11.5                                 | 18.7  | 28.6   | 34.5   |
| İri                | 10                     | 13.1                                 | 19.4  | 28.9   | 31.2   |
| İnce               | 20                     | 11.9                                 | 18    | 29.0   | 34.1   |
| Orta               | 20                     | 10.9                                 | 17.6  | 28.4   | 31.3   |
| İri                | 20                     | 10.3                                 | 16.7  | 24.6   | 27.1   |
| İnce               | 30                     | 8                                    | 13.5  | 25.6   | 30.2   |
| Orta               | 30                     | 7.1                                  | 12.9  | 22.7   | 27.1   |
| İri                | 30                     | 7.3                                  | 12.8  | 20.6   | 23.8   |

#### 4.2.2 Eğilme Dayanımı

Çalışılan deney serilerinden elde edilen eğilme dayanımı değerleri Tablo 4.3 de gösterilmiştir.

**Tablo 4.3** Deney Serilerinden Elde Edilen Eğilme Dayanımı Değerleri

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Eğilme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) |       |        |        |
|--------------------|------------------------|--------------------------------------|-------|--------|--------|
|                    |                        | 3 GÜN                                | 7 GÜN | 28 GÜN | 91 GÜN |
| -                  | 0                      | 3.1                                  | 4.8   | 6.4    | 7.3    |
| İnce               | 10                     | 2.7                                  | 3.8   | 6.0    | 7.6    |
| Orta               | 10                     | 2.6                                  | 3.8   | 5.9    | 7.0    |
| İri                | 10                     | 2.5                                  | 3.9   | 5.7    | 7.0    |
| İnce               | 20                     | 2.6                                  | 3.6   | 5.9    | 7.2    |
| Orta               | 20                     | 2.4                                  | 3.7   | 5.6    | 6.5    |
| İri                | 20                     | 2.3                                  | 3.4   | 5.2    | 6.0    |
| İnce               | 30                     | 1.8                                  | 2.9   | 5.3    | 6.7    |
| Orta               | 30                     | 1.6                                  | 2.7   | 4.9    | 6.1    |
| İri                | 30                     | 1.6                                  | 3.0   | 4.8    | 5.6    |

### 4.2.3 Ultrases Hızı

Çalışılan deney serilerinden elde edilen ultrases hızı değerleri Tablo 4.4 de gösterilmiştir.

**Tablo 4.4** Deney Serilerinden Elde Edilen Ultrases Hızı Değerleri

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Ultrases Hızı (km/s) |        |        |        |
|--------------------|------------------------|----------------------|--------|--------|--------|
|                    |                        | 7 GÜN                | 28 GÜN | 56 GÜN | 91 GÜN |
| -                  | 0                      | 4.61                 | 4.75   | 4.84   | 4.84   |
| İnce               | 10                     | 4.41                 | 4.67   | 4.75   | 4.81   |
| Orta               | 10                     | 4.39                 | 4.67   | 4.73   | 4.80   |
| İri                | 10                     | 4.40                 | 4.67   | 4.71   | 4.77   |
| İnce               | 20                     | 4.38                 | 4.62   | 4.68   | 4.73   |
| Orta               | 20                     | 4.36                 | 4.61   | 4.67   | 4.71   |
| İri                | 20                     | 4.26                 | 4.51   | 4.59   | 4.68   |
| İnce               | 30                     | 4.16                 | 4.58   | 4.63   | 4.67   |
| Orta               | 30                     | 4.12                 | 4.50   | 4.59   | 4.66   |
| İri                | 30                     | 4.07                 | 4.38   | 4.49   | 4.54   |

### 4.2.4 Kılcal Su Emme, Görünen Porozite (Hacimce Su Emme) ve

#### Birim Ağırlık

Üretilen Beton Numunelerin 28. ve 91. günlerde fiziksel özelliklerini değerlendirmek amacıyla yapılmış olan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.5 de gösterilmiştir.

**Tablo 4.5** Beton Numunelerin 28. ve 91. Günler için Hesaplanan Birim Ağırlık Değerleri, Hacimce Su Emme Yüzdesi ve Kapillarite Katsayıları

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) |         | Hacimce Su Emme (%) |         | Kapillarite Katsayısı K (cm <sup>2</sup> /s) |                       |
|--------------------|------------------------|------------------------------------|---------|---------------------|---------|----------------------------------------------|-----------------------|
|                    |                        | 28.GÜN                             | 91. GÜN | 28.GÜN              | 91. GÜN | 28.GÜN                                       | 91. GÜN               |
| -                  | 0                      | 2234                               | 2258    | 15.12               | 11.73   | $5.16 \times 10^{-6}$                        | $2.35 \times 10^{-6}$ |
| İnce               | 10                     | 2228                               | 2263    | 15.61               | 9.27    | $6.24 \times 10^{-6}$                        | $8.94 \times 10^{-7}$ |
| İnce               | 20                     | 2156                               | 2208    | 18.80               | 14.25   | $6.85 \times 10^{-6}$                        | $2.19 \times 10^{-6}$ |
| İnce               | 30                     | 2149                               | 2174    | 19.55               | 15.05   | $8.25 \times 10^{-6}$                        | $4.69 \times 10^{-6}$ |
| Orta               | 10                     | 2199                               | 2202    | 16.27               | 12.49   | $7.82 \times 10^{-6}$                        | $3.13 \times 10^{-6}$ |
| Orta               | 20                     | 2155                               | 2167    | 18.48               | 17.15   | $8.07 \times 10^{-6}$                        | $4.06 \times 10^{-6}$ |
| Orta               | 30                     | 2129                               | 2142    | 19.45               | 18.62   | $8.78 \times 10^{-6}$                        | $4.53 \times 10^{-6}$ |
| İri                | 10                     | 2186                               | 2189    | 16.62               | 14.88   | $7.73 \times 10^{-6}$                        | $2.49 \times 10^{-6}$ |
| İri                | 20                     | 2133                               | 2139    | 17.23               | 19.14   | $8.59 \times 10^{-6}$                        | $4.82 \times 10^{-6}$ |
| İri                | 30                     | 2104                               | 2112    | 20.17               | 19.33   | $1.1 \times 10^{-5}$                         | $5.83 \times 10^{-6}$ |

#### 4.2.5 Deniz Suyu Ortamında Saklanan Numunelerin Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı ve Ultrases Hızı Deney Sonuçları

İslanma-kuruma çevriminin olduğu deniz suyu ortamında saklanmış olan numunelerin basınç ve eğilme dayanımları 28. ve 91. günlerde, ultrases hızı değerleri 7, 28, 56 ve 91. günlerde tayin edilmiştir. Bu deneylerden elde edilen veriler Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.8 de gösterilmiştir.

**Tablo 4.6** Standart Kür Koşullarında ve Deniz Suyu Ortamında Saklanmış Numunelerin 28. ve 91. Günlerdeki Basınç Dayanımları

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame yüzdesi (%) | Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) |        |            |        |
|--------------------|------------------------|--------------------------------------|--------|------------|--------|
|                    |                        | Şebeke Suyu                          |        | Deniz suyu |        |
|                    |                        | 28 Gün                               | 91 Gün | 28 Gün     | 91 Gün |
| -                  | 0                      | 32.2                                 | 35.3   | 31.1       | 34.6   |
| İnce               | 10                     | 31.4                                 | 35.6   | 28.4       | 34.9   |
| İnce               | 20                     | 29                                   | 34.1   | 25.1       | 28.8   |
| İnce               | 30                     | 25.6                                 | 30.2   | 23.1       | 28.8   |
| Orta               | 10                     | 28.6                                 | 34.5   | 26.7       | 30.7   |
| Orta               | 20                     | 28.4                                 | 31.3   | 24.6       | 29.9   |
| Orta               | 30                     | 22.7                                 | 27.1   | 19.4       | 25.9   |
| İri                | 10                     | 28.9                                 | 31.2   | 27         | 30.6   |
| İri                | 20                     | 24.6                                 | 27.1   | 20.9       | 25.4   |
| İri                | 30                     | 20.6                                 | 23.8   | 18.4       | 23.4   |

**Tablo 4.6** Standart Kür Koşullarında ve Deniz Suyu Ortamında Saklanmış Numunelerin 28. ve 91. Günlerdeki Eğilme Dayanımları

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Eğilme Dayanımı ( N/mm <sup>2</sup> ) |        |            |        |
|--------------------|------------------------|---------------------------------------|--------|------------|--------|
|                    |                        | Şebeke Suyu                           |        | Deniz Suyu |        |
|                    |                        | 28 Gün                                | 91 Gün | 28 Gün     | 91 Gün |
| -                  | 0                      | 6.4                                   | 7.3    | 5.6        | 6.0    |
| İnce               | 10                     | 6.0                                   | 7.6    | 4.7        | 6.1    |
| İnce               | 20                     | 5.9                                   | 7.2    | 4.4        | 5.8    |
| İnce               | 30                     | 5.3                                   | 6.7    | 3.5        | 3.8    |
| Orta               | 10                     | 5.9                                   | 7.0    | 5.2        | 6.1    |
| Orta               | 20                     | 5.6                                   | 6.5    | 4.4        | 4.6    |
| Orta               | 30                     | 4.9                                   | 6.1    | 3.5        | 3.6    |
| İri                | 10                     | 5.7                                   | 7.0    | 3.9        | 6.2    |
| İri                | 20                     | 5.2                                   | 6.0    | 3.9        | 5.2    |
| İri                | 30                     | 4.8                                   | 5.6    | 4.0        | 3.9    |

**Tablo 4.8** Standart Kür Koşullarında ve Deniz Suyu Ortamında Saklanmış Numunelerin 7, 28, 56 ve 91. Günlerdeki Ultrases Hızı Değerleri

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame yüzdesi (%) | Ultrases hızı (km/s) |        |        |        |            |        |        |        |
|--------------------|------------------------|----------------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|
|                    |                        | Şebeke suyu          |        |        |        | Deniz suyu |        |        |        |
|                    |                        | 7 Gün                | 28 Gün | 56 Gün | 91 Gün | 7 Gün      | 28 Gün | 56 gün | 91 Gün |
| -                  | 0                      | 4.61                 | 4.75   | 4.84   | 4.84   | 4.39       | 4.53   | 4.59   | 4.62   |
| İnce               | 10                     | 4.41                 | 4.67   | 4.75   | 4.81   | 4.37       | 4.44   | 4.57   | 4.62   |
| İnce               | 20                     | 4.38                 | 4.62   | 4.68   | 4.73   | 4.20       | 4.41   | 4.53   | 4.55   |
| İnce               | 30                     | 4.16                 | 4.58   | 4.63   | 4.67   | 3.94       | 4.37   | 4.46   | 4.51   |
| Orta               | 10                     | 4.39                 | 4.67   | 4.73   | 4.80   | 4.35       | 4.50   | 4.55   | 4.67   |
| Orta               | 20                     | 4.36                 | 4.61   | 4.67   | 4.71   | 4.25       | 4.34   | 4.50   | 4.54   |
| Orta               | 30                     | 4.12                 | 4.50   | 4.59   | 4.66   | 3.97       | 4.26   | 4.39   | 4.52   |
| İri                | 10                     | 4.40                 | 4.67   | 4.71   | 4.77   | 4.36       | 4.44   | 4.62   | 4.73   |
| İri                | 20                     | 4.26                 | 4.51   | 4.59   | 4.68   | 4.12       | 4.39   | 4.49   | 4.59   |
| İri                | 30                     | 4.07                 | 4.38   | 4.49   | 4.54   | 3.94       | 4.20   | 4.37   | 4.38   |

## BÖLÜM 5

### DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ

#### 5.1 Taze Beton Özellikleri ile İlgili Sonuçların Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

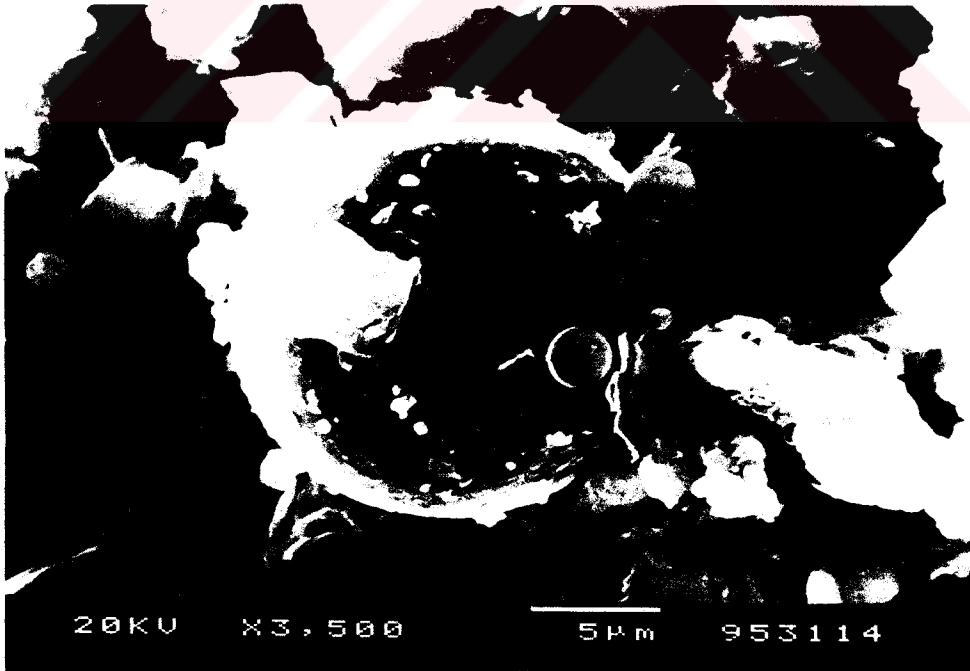
##### 5.1.1 Taze Betonun Su İhtiyacı

Üretilen serilerin aynı işlenebilirlik düzeyi için ihtiyaç duydukları su miktarları taze beton deneyleri bahsinde anlatıldığı gibi tespit edilmiştir. Karışıma giren su miktarlarını ve bu miktarlara göre değişen su/çimento oranlarını içeren veriler Tablo 5.1 de gösterilmiştir.

**Tablo 5.1** Üretilen Serilerin Sabit İşlenebilirlik için İhtiyaç Duydukları Su Miktarları

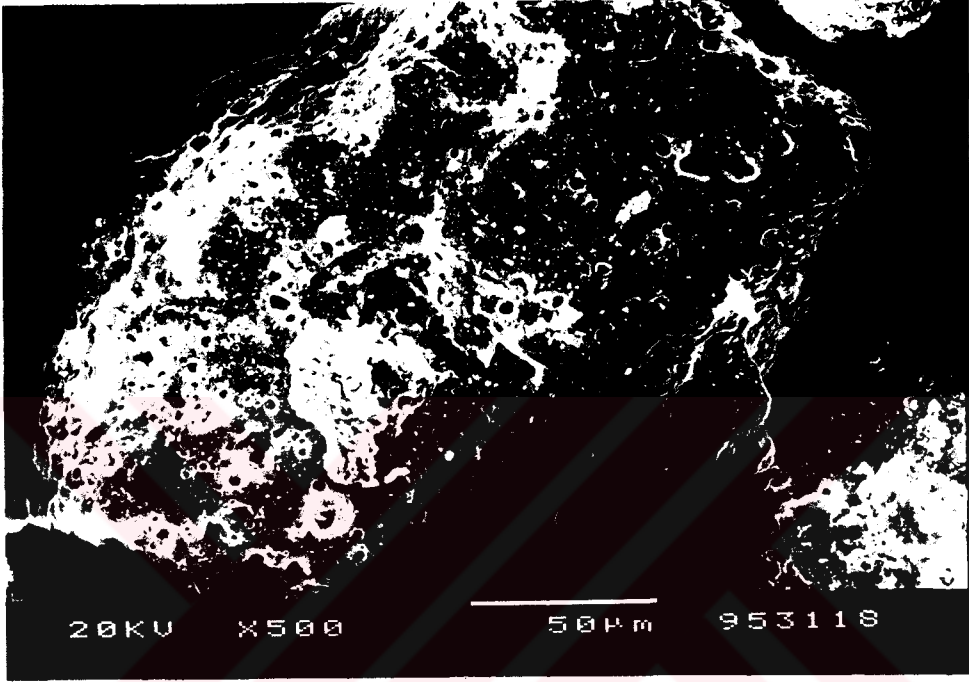
| Seri no | U.K. İkame<br>Yüzdesi (%) | Tane Boyutu<br>Sınıfı | Su İhtiyacı<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Su/Toplam<br>bağlayıcı malzeme | Çökme<br>(cm) |
|---------|---------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| 1       | 0                         | -                     | 228                                 | 0.76                           | 12            |
| 2       | 10                        | İnce                  | 232                                 | 0.77                           | 11.5          |
| 3       | 20                        | İnce                  | 232                                 | 0.77                           | 12            |
| 4       | 30                        | İnce                  | 237                                 | 0.79                           | 12            |
| 5       | 10                        | Orta                  | 232                                 | 0.77                           | 11.5          |
| 6       | 20                        | Orta                  | 236                                 | 0.79                           | 11.5          |
| 7       | 30                        | Orta                  | 244                                 | 0.81                           | 12            |
| 8       | 10                        | İri                   | 232                                 | 0.77                           | 11.5          |
| 9       | 20                        | İri                   | 241                                 | 0.81                           | 12.5          |
| 10      | 30                        | İri                   | 251                                 | 0.83                           | 12            |

Tablo 5.1 de görüldüğü gibi karışım suyuna en az ihtiyaç duyan üretim kontrol betonunda olmuştur. Uçucu kül ikamesi ikame yüzdesine ve uçucu külün inceliğine bağlı olarak su ihtiyacını artırmıştır. %10 nispetinde uçucu kül ikame edilen serilerde su ihtiyacı aynı olmuştur. Bunun ötesindeki ikame oranlarında ikame oranı ve irilik arttıkça işlenebilirlik için gerekli su miktarı da artmıştır. Örneğin, %30 nispetinde ince uçucu kül ikame edilmiş seri için karışıma 237 lt su katmak gerekmişken %30 nispetinde iri uçucu kül içeren seri için bu miktar 251 lt ye çıkmıştır. Çalışmanın başında böyle olduğu umulmayan bu sonuç biraz düşündürücü ve şaşırtıcı gelmiştir. Uçucu külün irileşmesiyle kullanıldığı karışımın daha fazla suya ihtiyaç duymasının makul bir açıklamasını yapabilmek için uçucu kül taneciklerinin fiziksel özelliklerinin daha kapsamlı olarak bilinmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu düşünceden yola çıkarak İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesinde ince ve iri uçucu kül numunelerinin taramalı elektron mikroskopi altında büyütülmüş görüntüleri elde edilmiş ve bu görüntüler ışığında iri uçucu külün inceye göre neden daha fazla su ihtiyacına sebep olduğu açıklanabilmiştir. Şekil 5.1 de görüldüğü gibi ince uçucu kül tanecikleri küresel forma sahiptir. Uçucu kül tanecikleri irileştikçe bu küresel formu kaybedip şekilsiz ve poroz bir yapıya dönmektedirler.



**Şekil 5.1** İnce Uçucu Kül Taneciklerinin Taramalı Elektron Mikroskopi Altındaki Tipik Görüntüsüne ait Resim

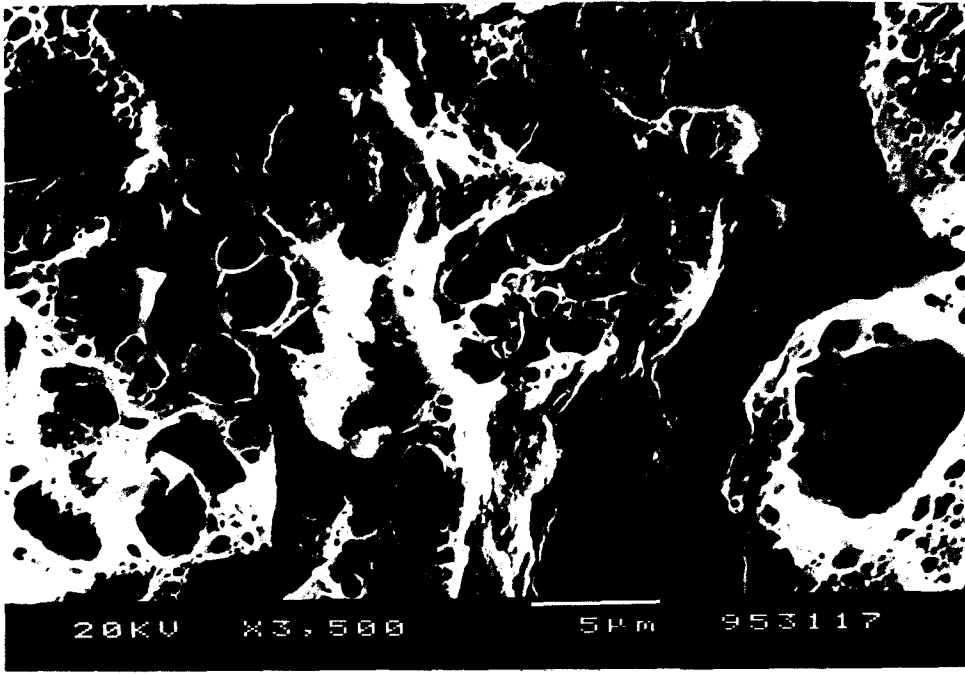
Bilindiği gibi tanelerin birbiri üzerindeki kayganlaştırıcı etkisi (Lubricant Effect) uçucu külün küresel forma sahip olması halinde söz konusudur. Yani iri uçucu kül tanelerinin işlenebilirliğe bir katkısı yoktur. İri uçucu kül taneciklerin tipik fiziksel yapısını yansıtan resim Şekil 5.2 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.2 İri Uçucu Kül Taneciklerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Altındaki Tipik Görüntüsüne Ait Resim**

İri uçucu kül taneciklerinin elektron mikroskobu altında daha büyütölmüş görüntüleri incelendiğinde görönen boşluklu yapıların, süngersi dokuların doğal olarak su ihtiyacını artırıcı nitelikte oldukları açıkça belli olmaktadır. Uçucu külün süngersi dokusunu yansıtan resim Şekil 5.3 de gösterilmiştir.

Taramalı elektron mikroskobu vasıtasıyla elde edilen bu görüntüler ile uçucu külün iriliğinin artması ile özgül ağırlığının neden azaldığını açıklamakta mümkün olmaktadır.



**Şekil 5.3** Taramalı Elektron Mikroskobu ile Çekilmiş İri Uçucu Külün Süngersi Dokusunu Gösteren bir Resim

## 5.2 Sertleşmiş Beton Deneylerine ait Sonuçların Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

### 5.2.1 Basınç Dayanımı

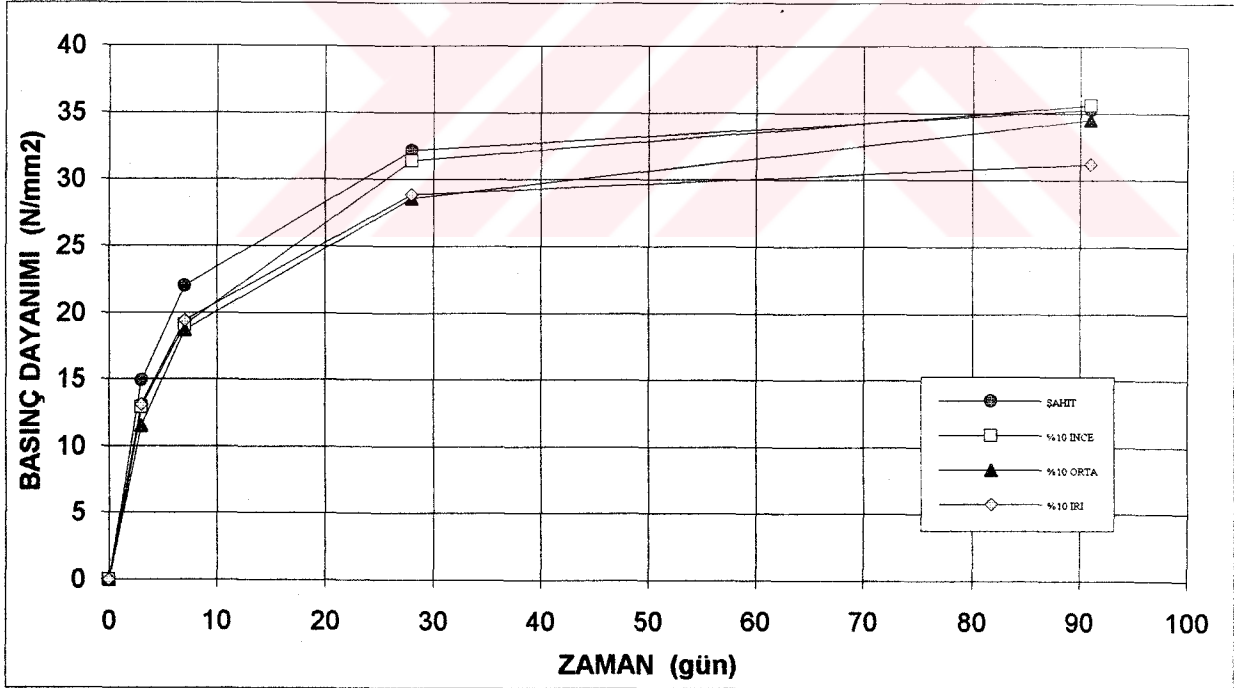
Önceki bölümde Tablo 4.2 de verilmiş olan basınç dayanımı değerleri ve aşağıda Tablo 5.2 de gösterilen uçucu kül içeren serilerin basınç dayanımlarının yaşa göre şahit basınç dayanımını karşılama oranlarından faydalanarak sonuçlar uçucu kül inceliğine ve ikame oranına bağlı olarak aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir.

**Tablo 5.2** Uçucu Kül İçeren Serilerin Basınç Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Şahit Basınç Dayanımını Karşılama Oranları

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Şahit Basınç Dayanımını Karşılama Oranı (%) |       |        |        |
|--------------------|------------------------|---------------------------------------------|-------|--------|--------|
|                    |                        | 3 GÜN                                       | 7 GÜN | 28 GÜN | 91 GÜN |
| İnce               | 10                     | 86.6                                        | 86.8  | 97.5   | 100.8  |
| Orta               | 10                     | 77.2                                        | 85    | 88.8   | 97.7   |
| İri                | 10                     | 87.9                                        | 88.2  | 89.8   | 88.4   |
| İnce               | 20                     | 79.9                                        | 81.8  | 90.1   | 96.6   |
| Orta               | 20                     | 73.2                                        | 80    | 88.2   | 88.7   |
| İri                | 20                     | 69.1                                        | 75.9  | 76.4   | 76.8   |
| İnce               | 30                     | 53.7                                        | 61.4  | 79.5   | 85.6   |
| Orta               | 30                     | 47.7                                        | 58.7  | 70.5   | 76.8   |
| İri                | 30                     | 49                                          | 58.2  | 64     | 67.4   |

**Farklı İnceliklerdeki %10 İkame Oranlı Serilerin Basınç Dayanımlarının Yaşa Bağlı Karşılaştırılması :**

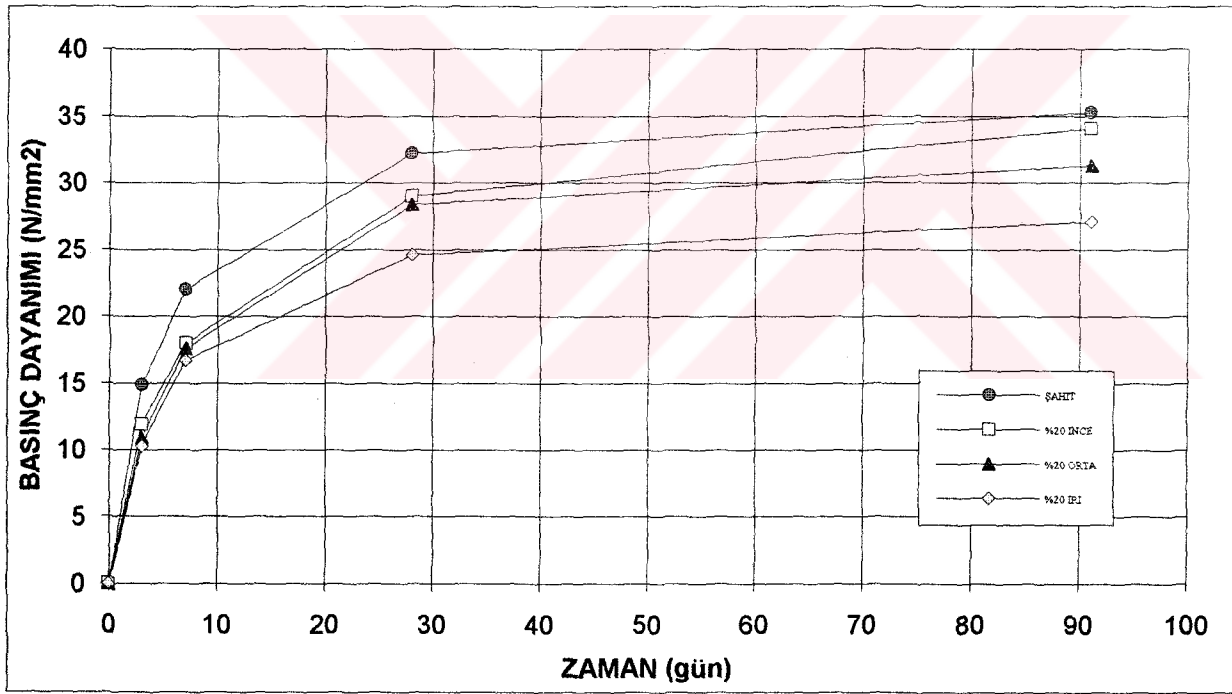
3 ve 7 günlük erken dayanımlarda incelik farkının etkisi gözlenememiştir. 28. günün sonunda ince uçucu kül içeren %10 ikame oranlı seri %98 karşılama oranı ile hemen hemen şahit dayanımını yakalamış, diğer %10 ikame oranlı seriler ise yaklaşık aynı mertebede şahit dayanımının %89' una ulaşabilmişlerdir. 91. günde ince uçucu kül içeren seri çok az bir farkla şahit basınç dayanımını geçmiştir. Orta incelikte uçucu kül içeren serinin basınç dayanımı da şahit ve ince uçucu kül içeren serilerinkine ulaştı denilebilecek seviyeye gelmiş, iri uçucu kül içeren seri ise ancak bu serilerin dayanımlarının yaklaşık %90' ına ulaşabilmiştir. Bu verileri ifade eden grafik Şekil 5.4 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.4** Farklı İnceliklerdeki %10 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları

**Farklı İnceliklerdeki %20 İkame Oranlı Serilerin Basınç Dayanımlarının Yaşa Bağlı Olarak Karşılaştırılması :**

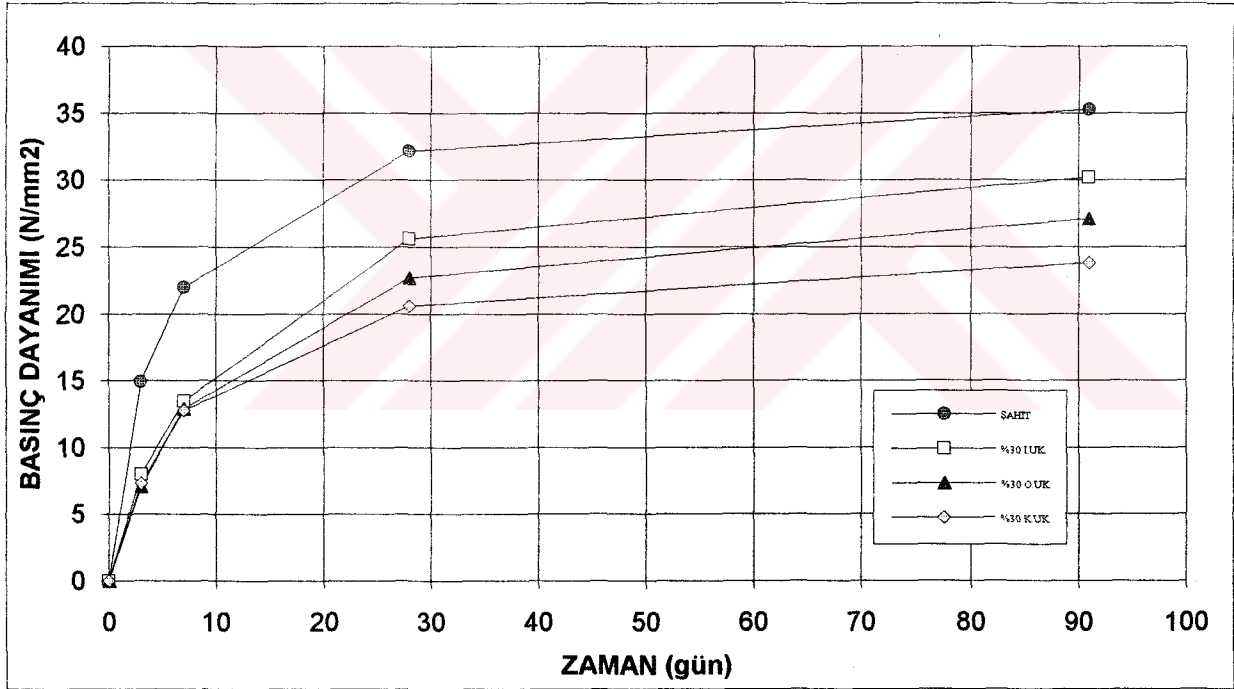
3 ve 7 günlük basınç dayanımı değerlerinde incelik farkının etkisinin çok önemli mertebede olmadığı gözlenmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarında ince ve orta incelikte uçucu kül içeren seriler hemen hemen aynı performansı göstermişler ( şahit basınç dayanımının %89' unu karşılamışlar ) , iri uçucu kül içeren seri ise şahit basınç dayanımının %76' sına ulaşabilmiştir. 91. günde sadece ince uçucu küllü seri %97 mertebesinde şahit dayanımına çok yaklaşabilmişken, orta incelikte uçucu kül içeren seri şahit dayanımının %89' unu karşılayabilmiş, iri uçucu kül içeren seri için ise bu oran %77 olmuştur. Bu verileri kapsayan grafik Şekil 5.5 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.5 Farklı İnceliklerdeki %20 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları**

**Farklı İnceliklerdeki %30 İkame Oranlı Serilerin Basınç Dayanımlarının Yaşa Bağlı Olarak Karşılaştırılması :**

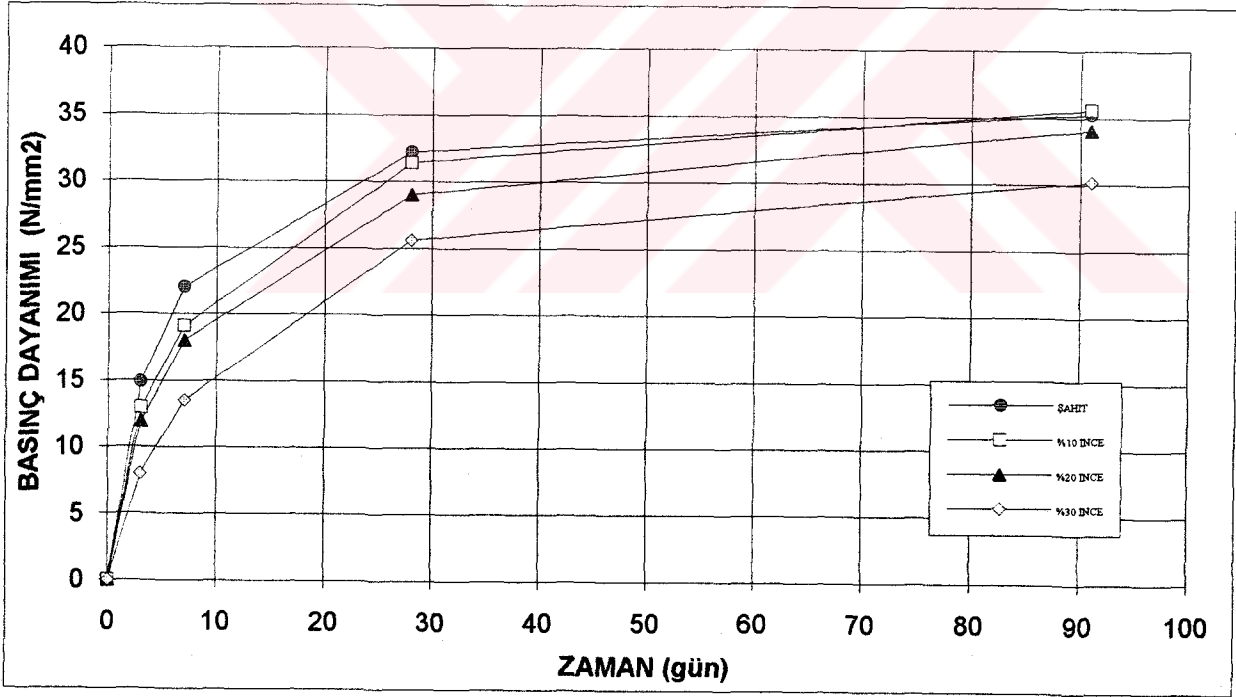
%30 ikame oranı için de diğer ikame oranlarına benzer olarak 3 ve 7 günlük erken dayanımlarda incelik farkının etkisi gözlenememiştir. Ancak bunun ötesindeki yaşlarda 28. ve 91. günlerde uçucu kül irileştikçe basınç dayanımı bariz ölçüde azalmıştır. 91. gün sonunda şahit dayanımını %86 oranı ile en fazla ince uçucu küllü seri karşılamışken , orta incelikte uçucu kül içeren seri için bu oran %77 olmuş, iri uçucu kül içeren seride ise %67 ile en düşük seviyede kalmıştır. Bu serilerin yaşa bağlı basınç dayanımı verilerini gösteren grafik Şekil 5.6 da gösterilmiştir.



**Şekil 5.6 Farklı İnceliklerdeki %30 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları**

**İnce Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranının Artışı ile Basınç Dayanımındaki Değişim :**

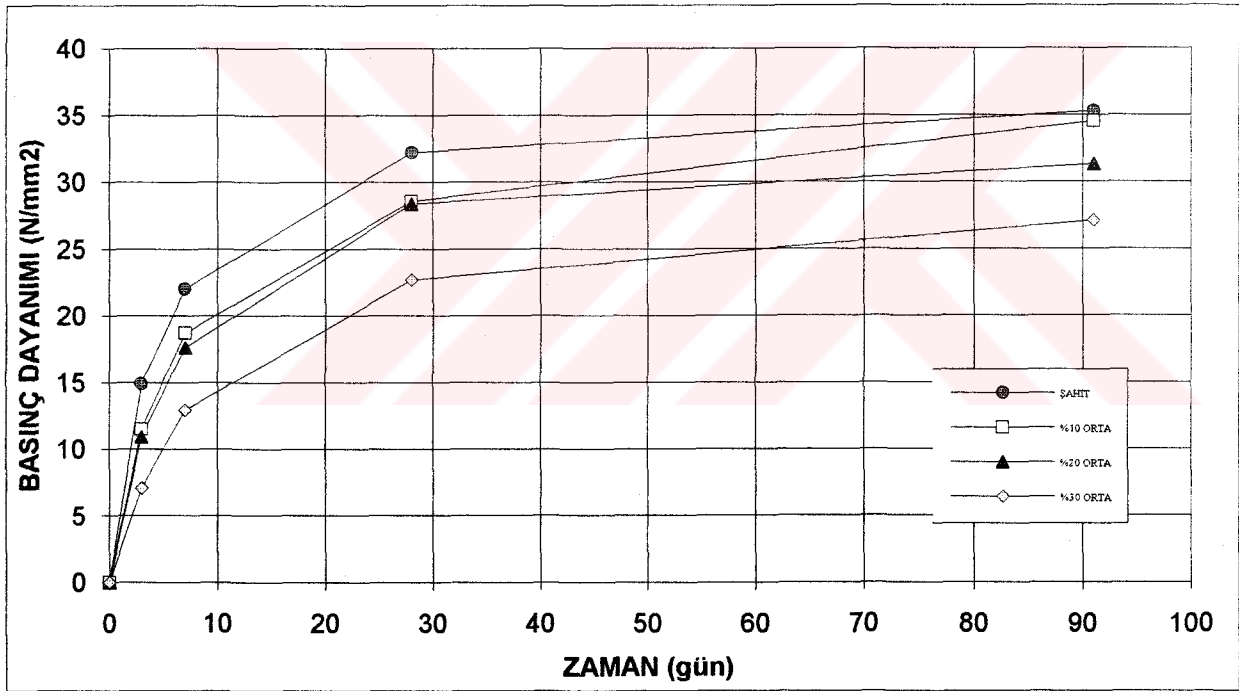
7 günlük verilere göre ince uçucu küllü serilerin tamamının basınç dayanımı şahit basınç dayanımının altında kalmıştır. 28. günde %10 ince uçucu kül içeren serinin basınç dayanımı %98 karşılama oranı ile hemen hemen şahit ile aynı seviyeye ulaşmıştır. %20 ve %30 ikame oranlı seriler bu seviyeye ulaşamamışlardır. 91 günlük basınç dayanımlarında %10 ikame oranlı serinin şahit dayanımını az farkla aştığı gözlenmiştir. %20 ikame oranlı seri de %97 karşılama oranı ile şahit dayanımına oldukça yaklaşmıştır. %30 ikame oranlı seri ise önceki yaşlarda olduğu gibi en düşük dayanımı vermiştir. Buna karşın erken yaşta şahit dayanımının %54' ünü karşılayabilmişken 91. güne gelindiğinde karşılama oranının %86'ya ulaştığı dikkat çekmiştir. Bu verileri yansıtan grafik Şekil 5.7 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.7** Farklı İkame Oranlarında İnce Uçucu Kül İçeren Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları

**Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranının Artışı ile Basıncı Dayanımındaki Değişim :**

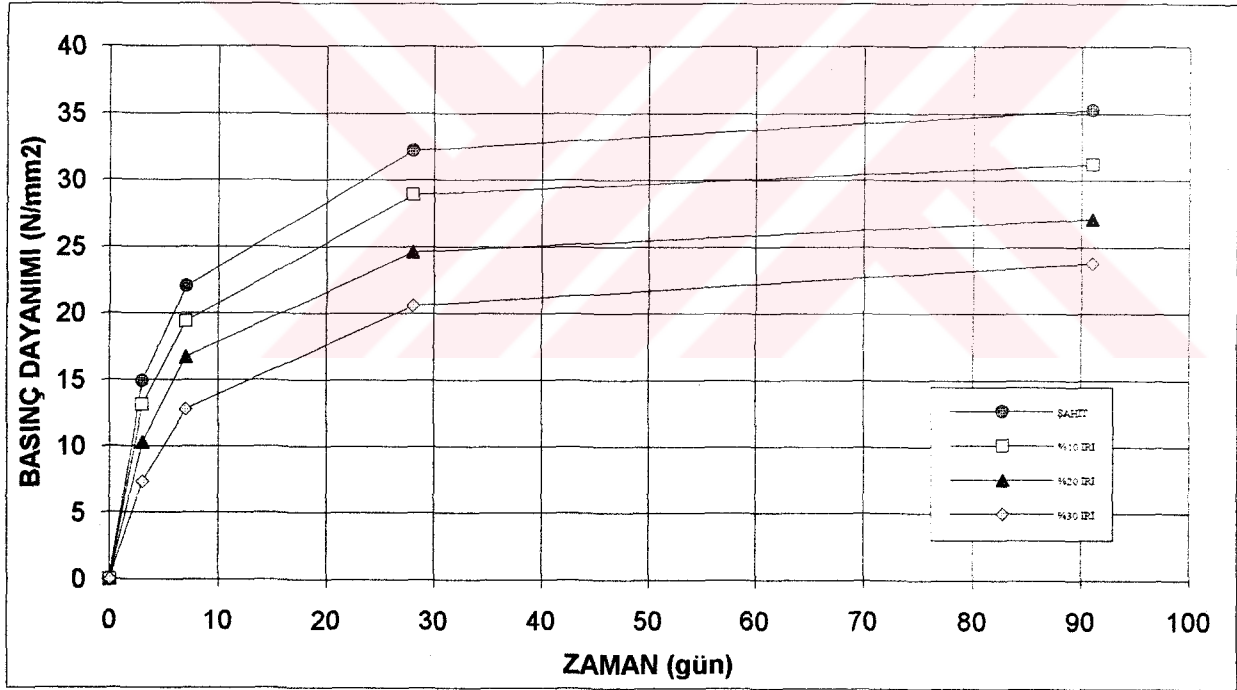
Erken yaşlarda ( 3-28 günler arası ) uçucu küllü serilerin tamamı şahit dayanımının altında kalmıştır. 28. güne kadar %10 ve %20 ikame oranlı seriler hemen hemen birbirine eşit dayanım kazanma hızı göstermişlerdir. %30 ikame oranlı seri ise 28 günlük şahit dayanımının ancak %70' ini karşılayabilmiştir. 91. günde %10 ikame oranlı seri %98 karşılama oranı ile hemen hemen şahit dayanımını yakalamıştır. %20 ikame oranı için bu nispet %89' a, %30 ikame oranı için ise %77' ye ulaşmıştır. Bu veriler ile ilgili grafik ifade Şekil 5.8 de gösterilmektedir.



**Şekil 5.8** Farklı İkame Oranlarında Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Serilerin Zamana Bağlı Basıncı Dayanımları

### İri Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranının Artışı ile Basınç Dayanımındaki Değişim :

En düşük ikame oranında bile hiç bir yaşta şahit basınç dayanımına ulaşamamıştır. 28. günde %10 ikame oranlı seri şahiti %90 oranında karşılayabilmiş, yine 91. günde bu oran hemen hemen aynı kalmıştır. Benzer bir davranışla %20 ikame oranlı seri 28. günde şahit basınç dayanımının %77' sini karşılayabilmiş, yine 91. günde bu oran aynı kalmış, artmamıştır. %30 oranında iri uçucu kül içeren seri ise bütün seriler içinde en düşük basınç dayanımı veren seri olmuştur. Bu seri 91. günde şahit basınç dayanımının en fazla %67' sine ulaşabilmiştir. Bu verileri kapsayan grafik Şekil 5.9 da gösterilmiştir.

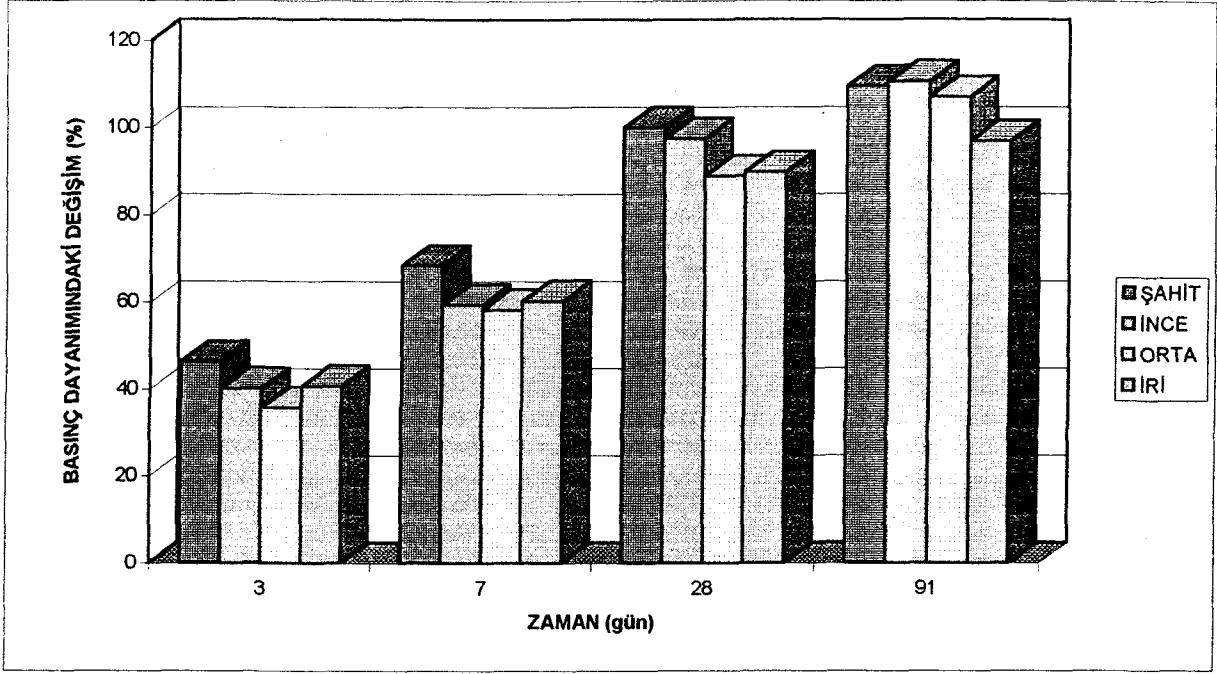


**Şekil 5.9** Farklı İkame Oranlarında İri Uçucu Kül İçeren Serilerin Zamana Bağlı Basınç Dayanımları

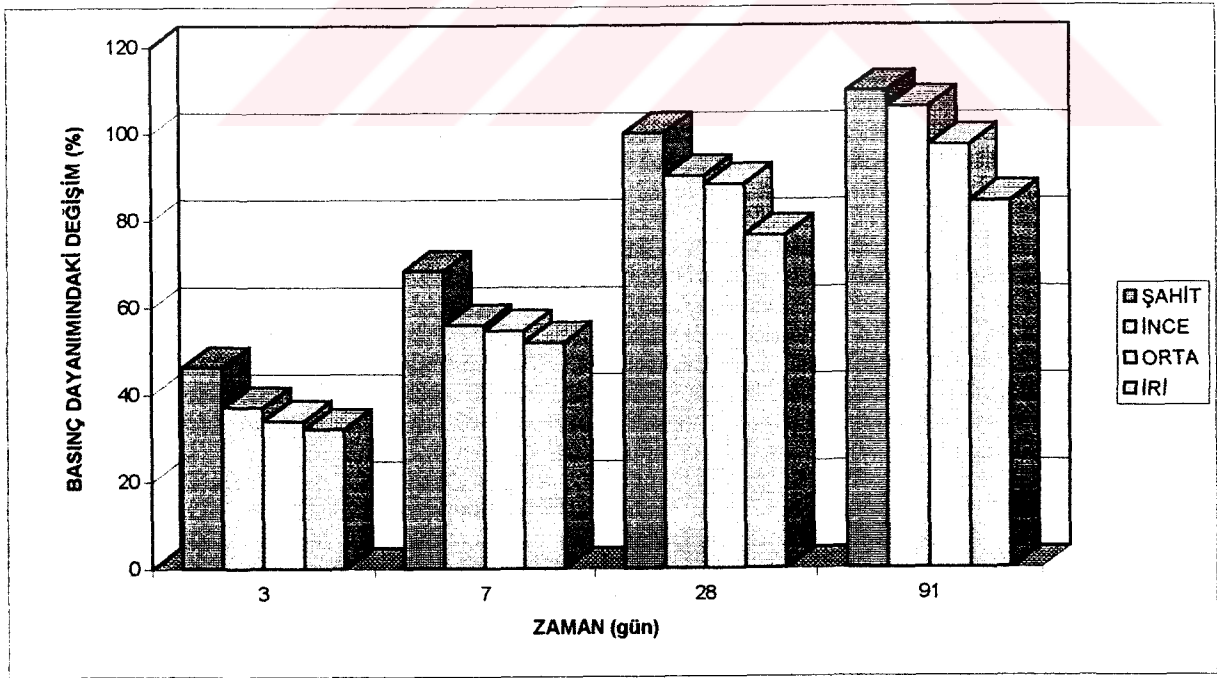
Şahit 28 günlük basınç dayanımını 100 birim kabul etmek suretiyle farklı inceliklerdeki serilerin zamana bağlı basınç dayanımı değerleri 28 günlük şahit basınç dayanımının yüzdesi olarak ifade edildiğinde incelik faktörünün basınç dayanımı üzerindeki etkisi daha net şekilde gözlenmektedir. Farklı ikame oranları için bu tip bir değerlendirmeyi yansıtan tablo ve grafik ifadeler Tablo 5.3 , Şekil 5.10 , Şekil 5.11 , ve Şekil 5.12 de gösterilmiştir.

**Tablo 5.3** 28 Günlük Şahit Basınç Dayanımının Yüzdesi Olarak Zamana Bağlı Basınç Dayanımları

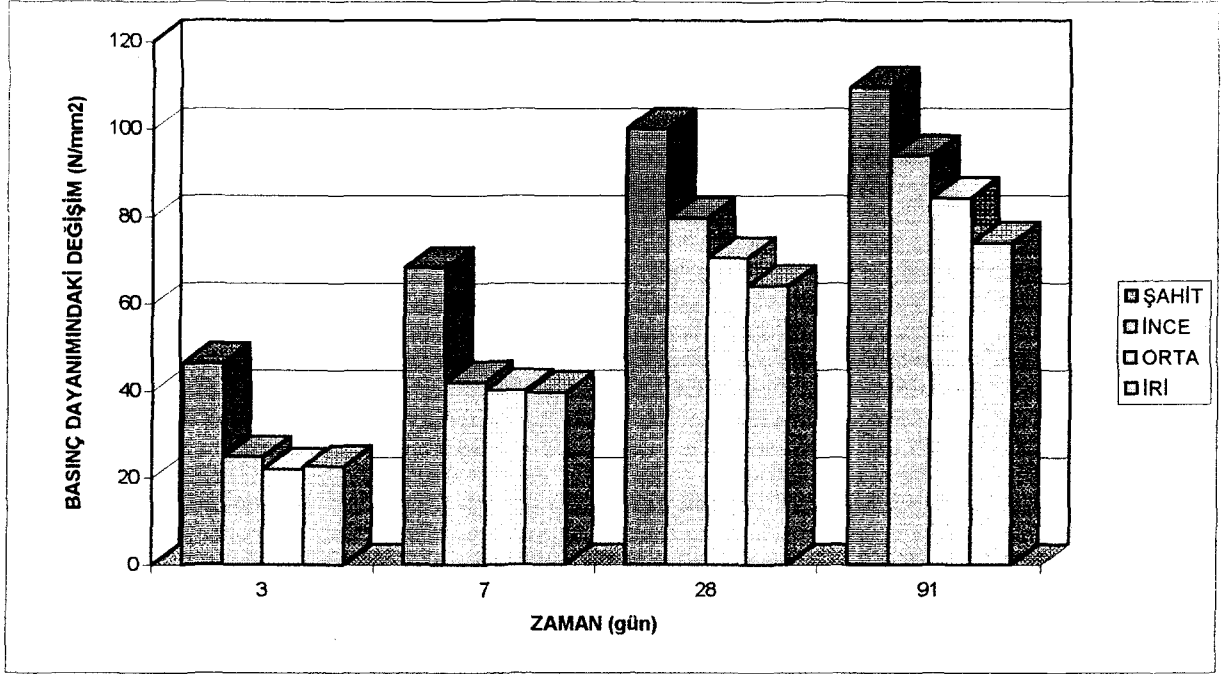
| Tane Boyutu<br>Sınıfı | U.K. İkame<br>Yüzdesi (%) | Basınç Dayanımı ( % ) |       |        |        |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-------|--------|--------|
|                       |                           | 3 GÜN                 | 7 GÜN | 28 GÜN | 91 GÜN |
| -                     | 0                         | 46.3                  | 68.3  | 100    | 109.6  |
| İnce                  | 10                        | 40.1                  | 59.3  | 97.5   | 110.6  |
| Orta                  | 10                        | 35.7                  | 58.1  | 88.8   | 107.1  |
| İri                   | 10                        | 40.7                  | 60.2  | 89.8   | 96.9   |
| İnce                  | 20                        | 37                    | 55.9  | 90.1   | 105.9  |
| Orta                  | 20                        | 33.9                  | 54.7  | 88.2   | 97.2   |
| İri                   | 20                        | 32                    | 51.9  | 76.4   | 84.2   |
| İnce                  | 30                        | 24.8                  | 41.9  | 79.5   | 93.8   |
| Orta                  | 30                        | 22                    | 40.1  | 70.5   | 84.2   |
| İri                   | 30                        | 22.7                  | 39.6  | 64     | 73.9   |



**Şekil 5.10** %10 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Dayanımına Oranla Yaşa Göre Kazandıkları Basınç Dayanımları

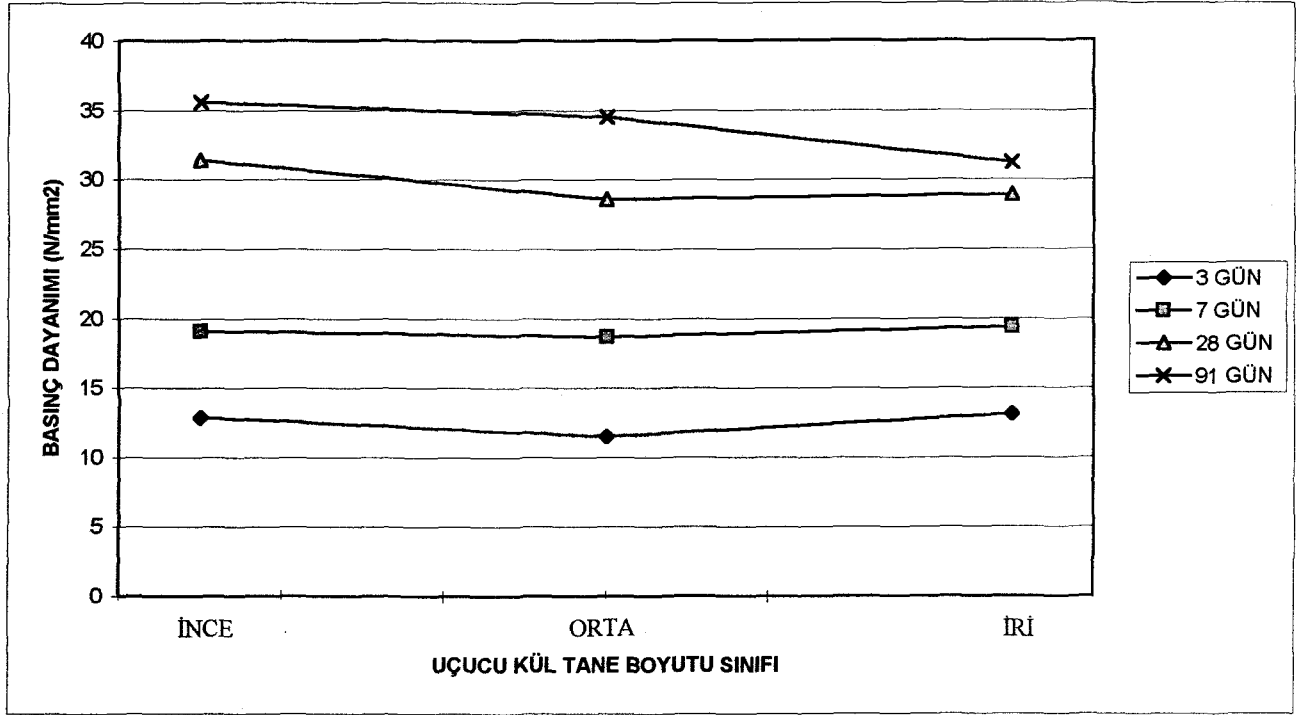


**Şekil 5.11** %20 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Dayanımına Oranla Yaşa Göre Kazandıkları Basınç Dayanımları

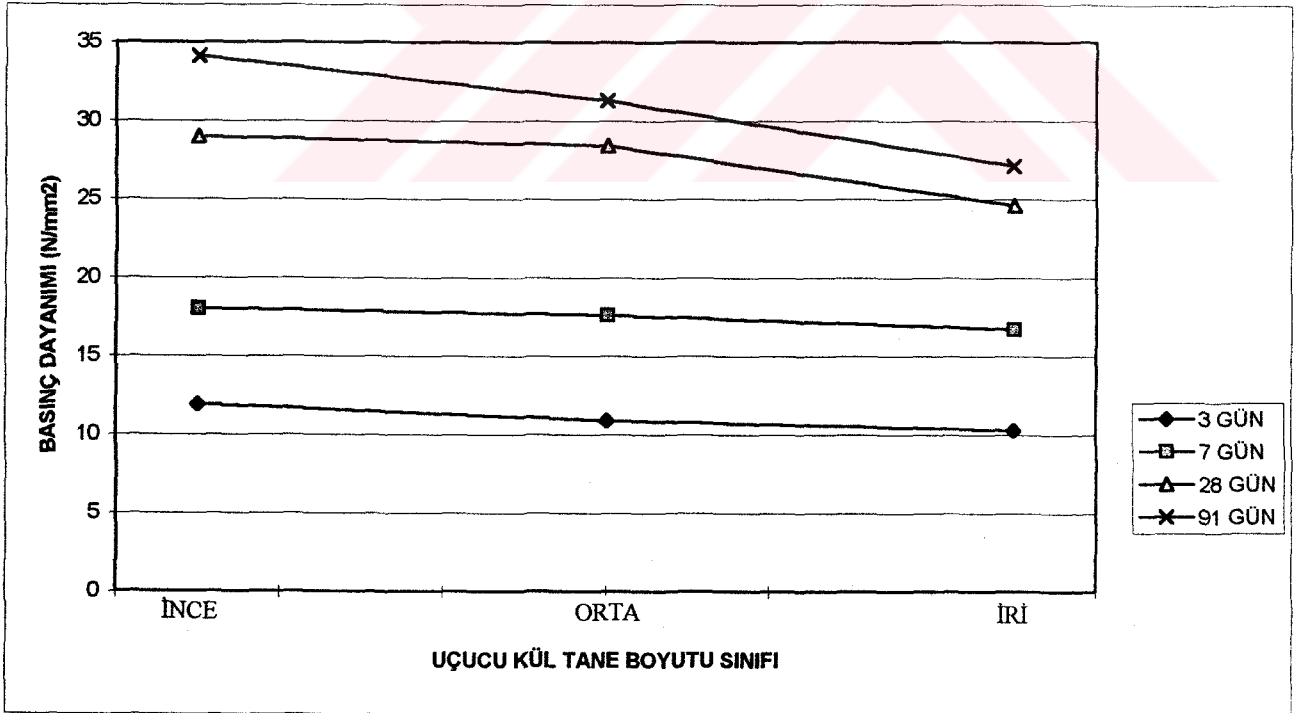


**Şekil 5.12** %30 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Dayanımına Oranla Yaşa Göre Kazandıkları Basınç Dayanımları

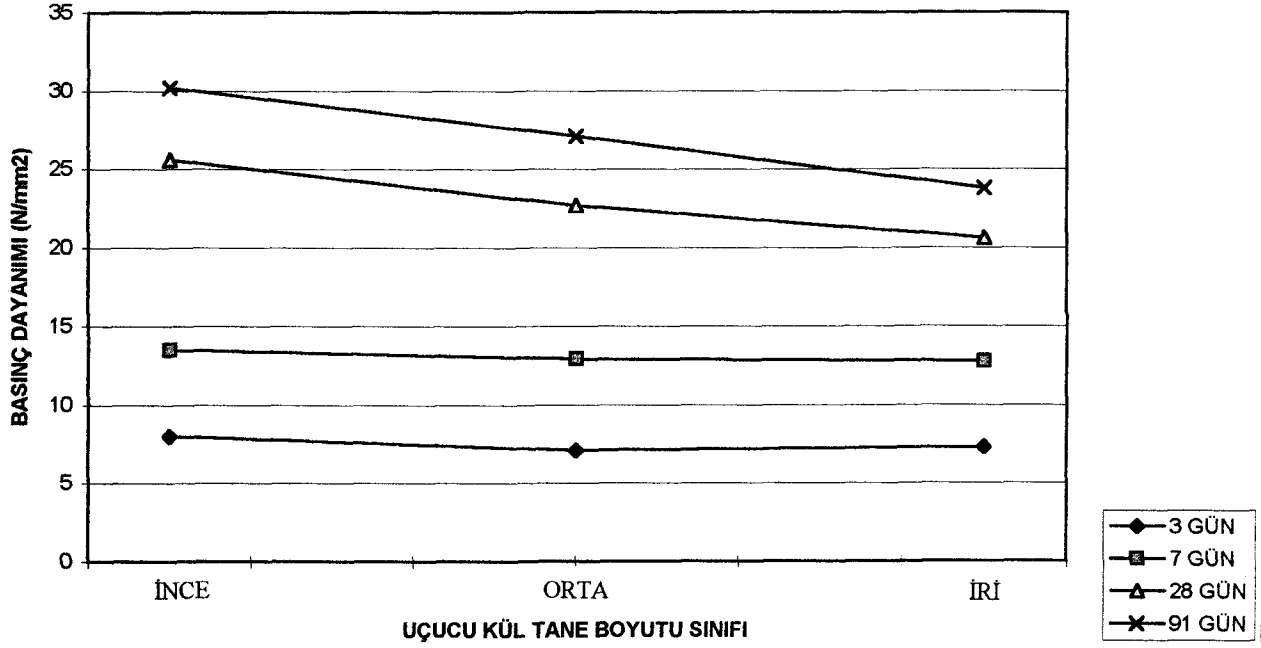
Yine farklı bir ifade tarzı ile incelik değişimine bağlı olarak yaşa göre basınç dayanımlarının aldığı değerler her ikame oranı için grafik olarak Şekil 5.13 , Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 de gösterilmiştir. Bu üç grafik birlikte değerlendirildiğinde 3. ve 7. güne karşılık gelen eğrilerin eğimlerinin hemen hemen sabit kaldığı , 28. ve 91. güne karşılık gelen eğrilerin ise uçucu kül irileştikçe negatif bir eğim kazandığı, uçucu kül ikame oranı arttıkça bu negatif eğimin daha da arttığı görülmektedir.



**Şekil 5.13** %10 ikame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Basınç Dayanımlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması



**Şekil 5.14** %20 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Basınç Dayanımlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması



**Şekil 5.15** %30 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Basınç Dayanımlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması

Basınç dayanımı ile ilgili olarak yapılan bütün bu değerlendirmeler neticesinde bazı genel yorumlamalar yapılabilir. Bunlardan birincisi 3 ve 7 günlük erken yaşlara ait basınç dayanımı değerlerinde incelik faktörünün belirgin bir etkisinin olmadığıdır. 28. ve 91. günlere ait değerlerde ise uçucu kül inceliğinin etkisi farkedilir ölçüde ortaya çıkmaktadır. Bir diğer değerlendirme de uçucu kül ikame oranına bağlı olarak yapılabilir. Uçucu kül ikame oranı arttıkça incelik faktörünün etkisinde kendini daha bariz olarak göstermektedir.

### 5.2.2 Eğilme Dayanımı

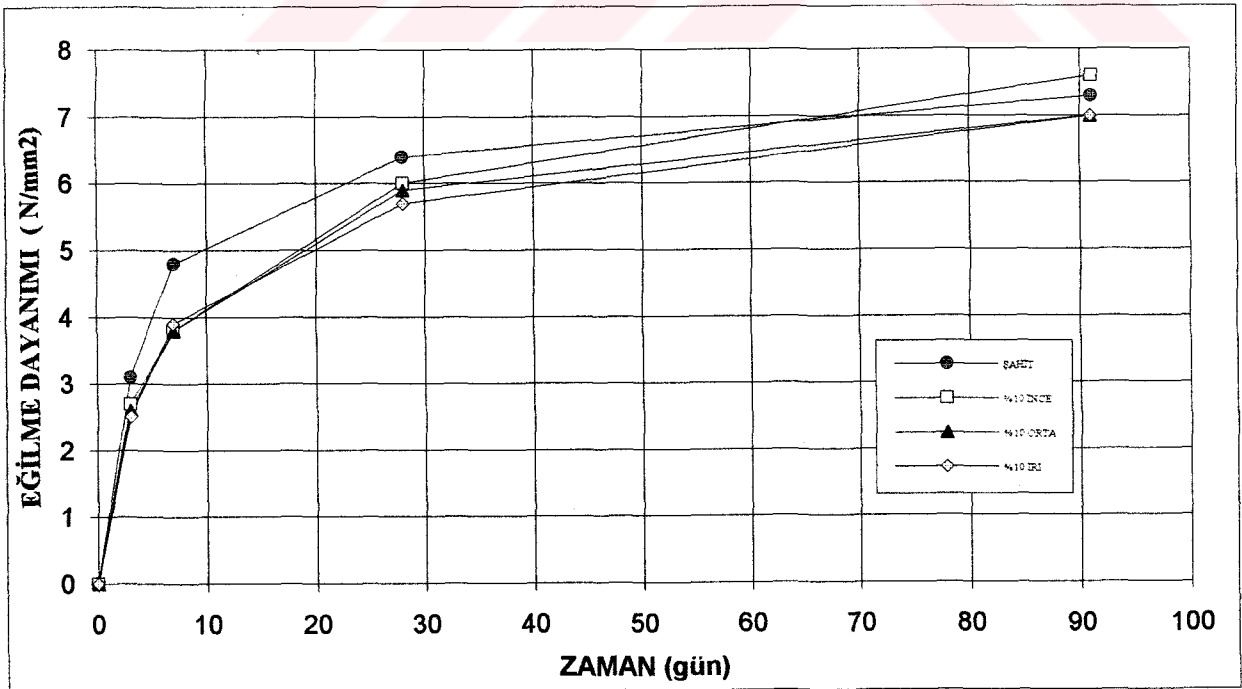
Bölüm 4 'de Tablo 4.3 de verilmiş olan eğilme dayanımı değerlerini ve aşağıda Tablo 5.4 de gösterilen uçucu kül içeren serilerin eğilme dayanımlarının yaşı göre şahit eğilme dayanımını karşılama oranlarını dikkate alarak eğilme dayanımı ile ilgili sonuçlar uçucu kül inceliğine ve ikame oranına bağlı olarak aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir.

**Tablo 5.4** Uçucu Kül İçeren Serilerin Eğilme Dayanımlarının Yaşa Bağlı Olarak Şahit Eğilme Dayanımını Karşılama Oranları

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Şahit Eğilme Dayanımını Karşılama Oranı (%) |       |        |        |
|--------------------|------------------------|---------------------------------------------|-------|--------|--------|
|                    |                        | 3 GÜN                                       | 7 GÜN | 28 GÜN | 91 GÜN |
| İnce               | 10                     | 87.1                                        | 79.2  | 93.8   | 104.1  |
| Orta               | 10                     | 83.9                                        | 79.2  | 92.2   | 95.9   |
| İri                | 10                     | 80.6                                        | 81.3  | 89.1   | 95.9   |
| İnce               | 20                     | 83.9                                        | 75.0  | 92.2   | 98.6   |
| Orta               | 20                     | 77.4                                        | 77.1  | 87.5   | 89.0   |
| İri                | 20                     | 74.2                                        | 70.8  | 81.3   | 82.2   |
| İnce               | 30                     | 58.1                                        | 60.4  | 82.8   | 91.8   |
| Orta               | 30                     | 51.6                                        | 56.3  | 76.6   | 83.6   |
| İri                | 30                     | 51.6                                        | 62.3  | 75     | 76.7   |

**Farklı İnceliklerdeki %10 İkame Oranlı Serilerin Eğilme Dayanımlarının Yaşa Bağlı Olarak Karşılaştırılması :**

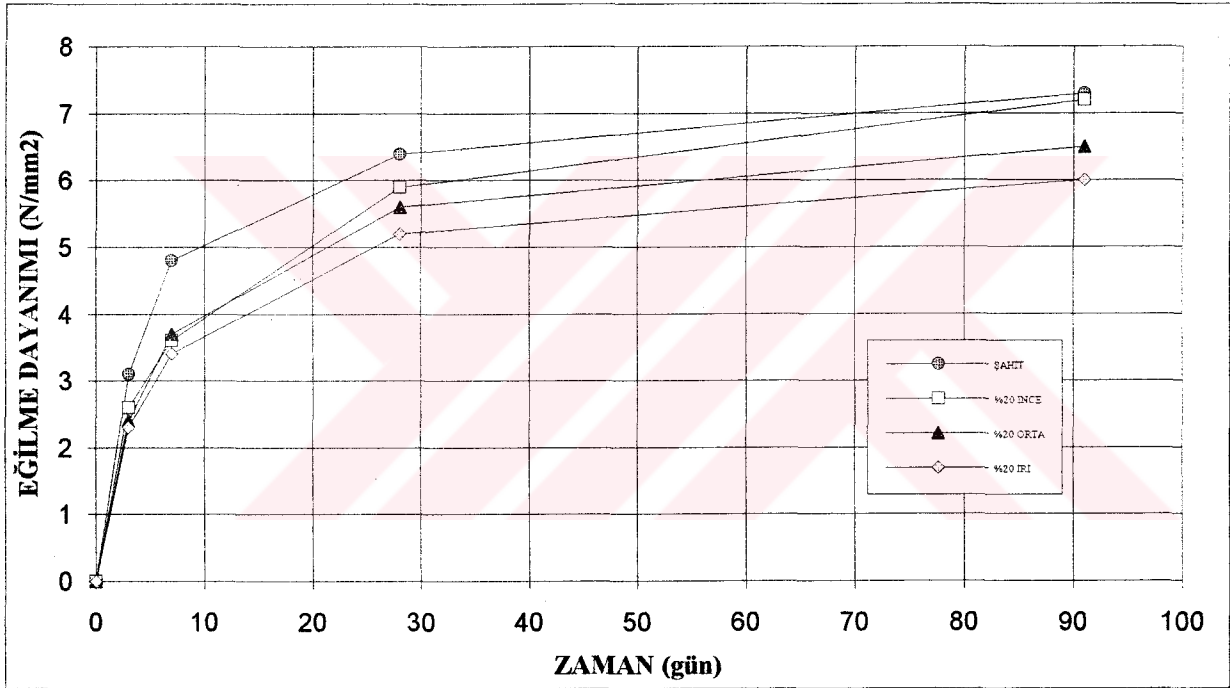
%10 ikame oranı için erken dayanımlarda ( 28. güne kadar ) her üç incelikte birbirine çok yakın değerler almışlardır. 91. günde ince serinin eğilme dayanımı şahitinkini geçmiş ( %104 karşılama oranı ile ), orta incelikte ve iri uçucu kül içeren serilerin eğilme dayanımları ise birbirine eşit ve %96 karşılama oranı ile şahitinkine oldukça yakın bir seviyeye ulaşmışlardır. Bu verileri yansıtan grafik Şekil 5.16 da gösterilmiştir.



**Şekil 5.16** Farklı İnceliklerdeki %10 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki

**Farklı İnceliklerdeki %20 İkame Oranlı Serilerin Eğilme Dayanımlarının Yaşa Bağlı Olarak Karşılaştırılması :**

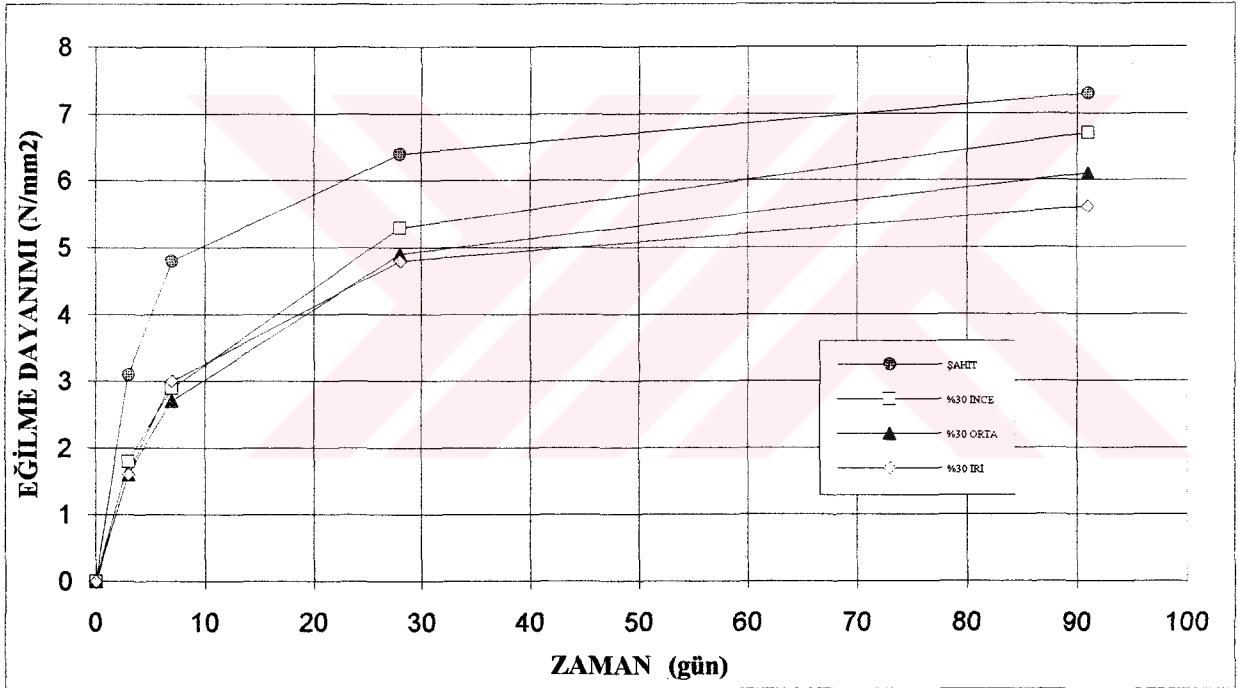
%20 ikame oranı için 28. günden itibaren inceliğin etkisi gözlenmektedir. 91. günde ince uçucu kül içeren serinin eğilme dayanımı ile şahit eğilme dayanımı arasında anlamlı bir fark görülmemektedir. Orta incelikte uçucu kül içeren seri şahit dayanımının %89' unu karşılayabilmişken, iri uçucu kül içeren seri için bu oran ancak %82' yi bulmuştur. Bu verileri ifade eden grafik Şekil 5.17 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.17** Farklı İnceliklerdeki %20 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki

**Farklı İnceliklerdeki %30 İkame Oranlı Serilerin Eğilme Dayanımlarının Yaşa Bağlı Olarak Karşılaştırılması :**

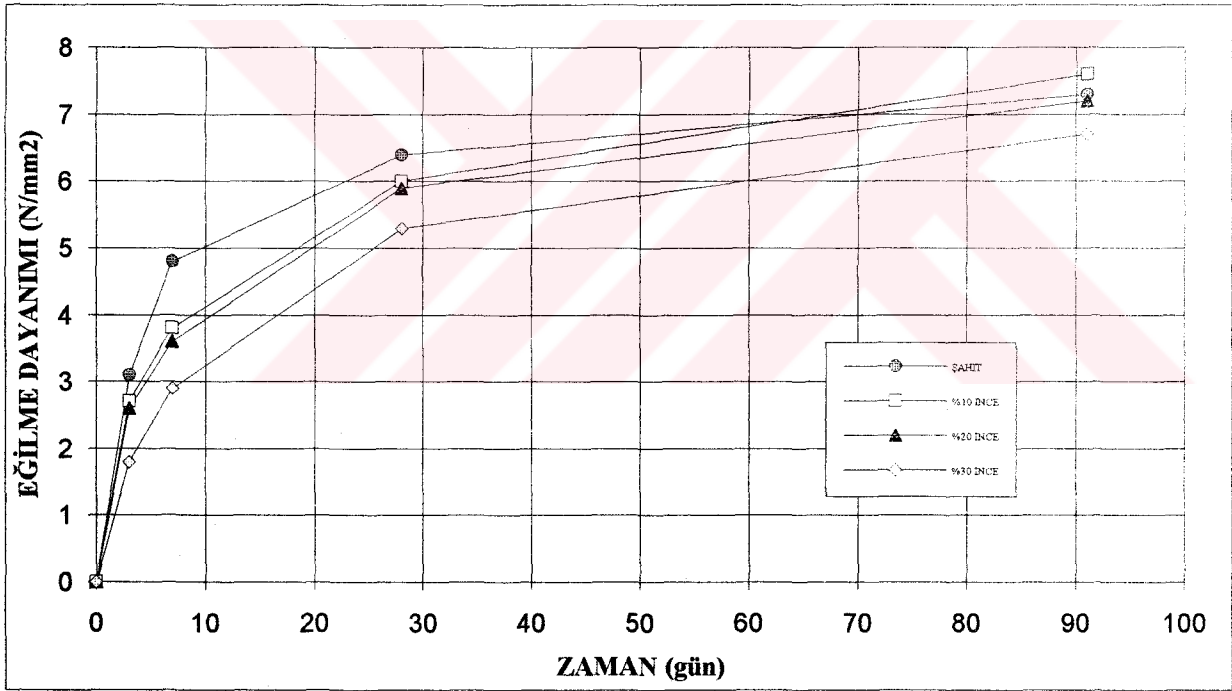
%30 ikame oranı için de incelik faktörünün etkisi ileriki yaşlarda daha çok ortaya çıkmakla birlikte bütün uçucu küllü seriler her yaşta şahit eğilme dayanımına ulaşamamıştır. 7 güne kadar her üç inceliğin de şahit eğilme dayanımını karşılama nispetinin oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. Bu verileri içeren grafik ifade Şekil 5.18 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.18** Farklı İnceliklerdeki %30 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Eğilme Dayanımları Arasındaki İlişki

### İnce Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranının Artışı ile Eğilme Dayanımındaki Değişim :

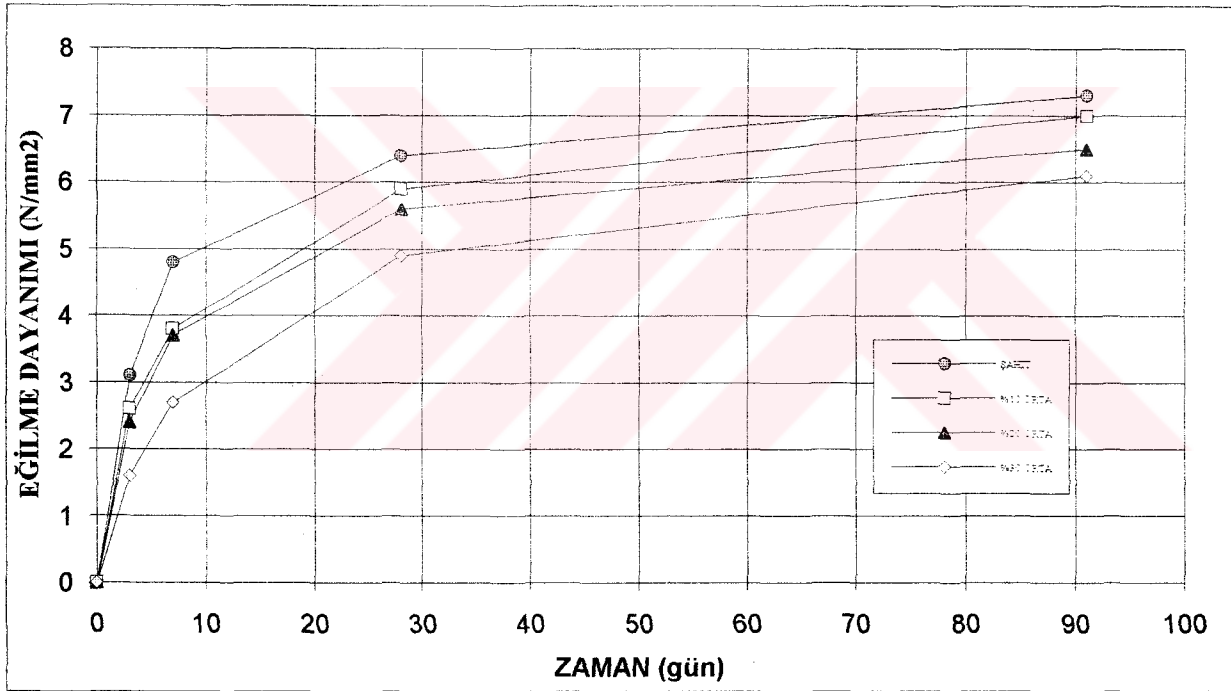
Erken yaşlarda ( 28. güne kadar ) %10 ve %20 ikame oranlı serilerin eğilme dayanımlarının hemen hemen birbirine eşit ve şahitinkinden düşük olduğu, %30 ikame oranlı serinin ise her yaşta en düşük eğilme dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. 91 günlük dayanımlarda %10 ikame oranlı seri şahiti geçmiş, %20 ikame oranlı seri ise şahit ile eşit denilebilecek seviyeye ulaşmıştır. %30 ikame oranlı serinin 3 günlük eğilme dayanımı şahitin eğilme dayanımının %58' ni karşılayabilmişken 91. günde bu oranın %92'ye yükseldiği dikkati çekmektedir. Bu verileri içeren grafik Şekil 5.19 da gösterilmiştir.



**Şekil 5.19** İnce Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranına Göre Eğilme Dayanımındaki Değişim

**Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranına Göre Eğilme Dayanımındaki Değişim :**

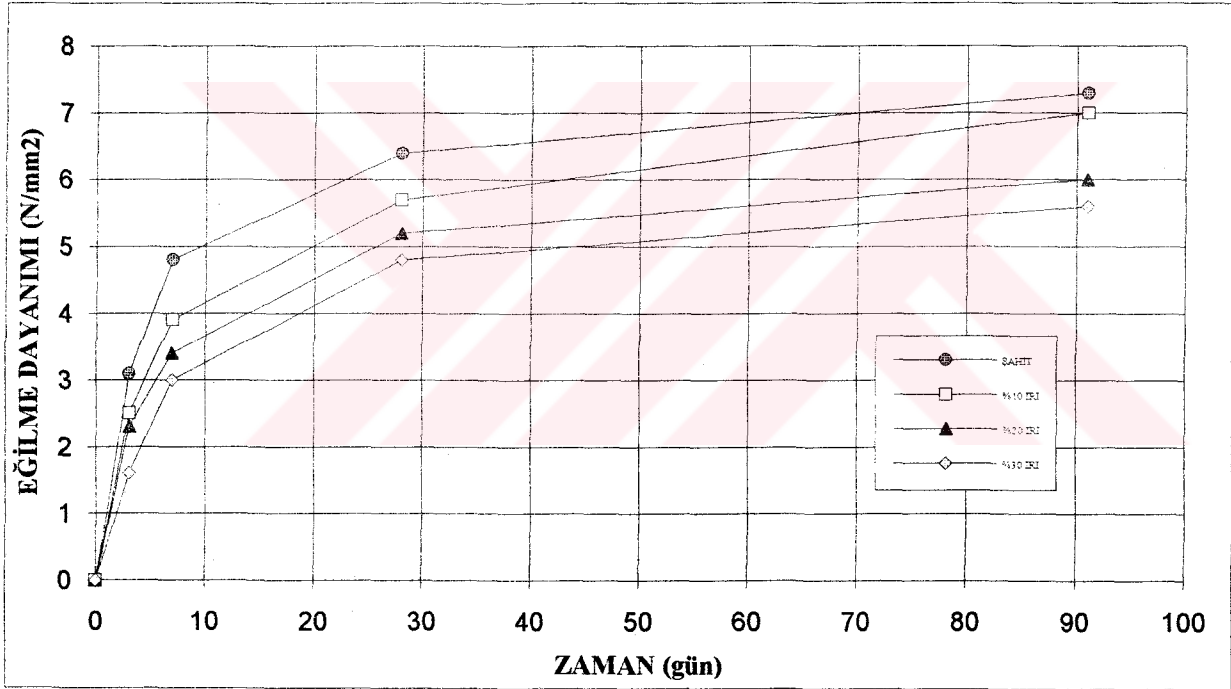
Bu serilerde de 7 güne kadar %10 ve %20 ikame oranlı serilerin eğilme dayanımlarının eşit olduğu kabul edilebilirken yaş ilerledikçe ikame oranları arasındaki dayanım farkları da bariz hale gelmiştir. 91. gün sonunda %10 ikame oranlı seri şahit eğilme dayanımını %96 nispetinde karşılamış olmakla birlikte hiçbir uçucu küllü seri şahit eğilme dayanımı seviyesine ulaşamamıştır. Bu nispet %20 ikame oranlı seri için %89'a , %30 ikame oranlı seri için %84'e düşmüştür. Bu veriler ile ilgili grafik ifade Şekil 5.20 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.20** Orta İncelikte Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranına göre Eğilme Dayanımındaki Değişim

**İri Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranına Göre Eğilme Dayanımındaki Değişim :**

İri uçucu kül içeren seriler için ikame oranı arttıkça her yaşta eğilme dayanımında azalmıştır. 91. günde %10 ikame oranlı seri şahit eğilme dayanımını %96 nispetinde karşılayabilmişken bütün seriler içinde en çok iri uçucu kül içeren seri ancak %77'lik bir karşılama oranına ulaşabilmiştir. Bu verileri kapsayan grafik ifade Şekil 5.21 de gösterilmiştir.

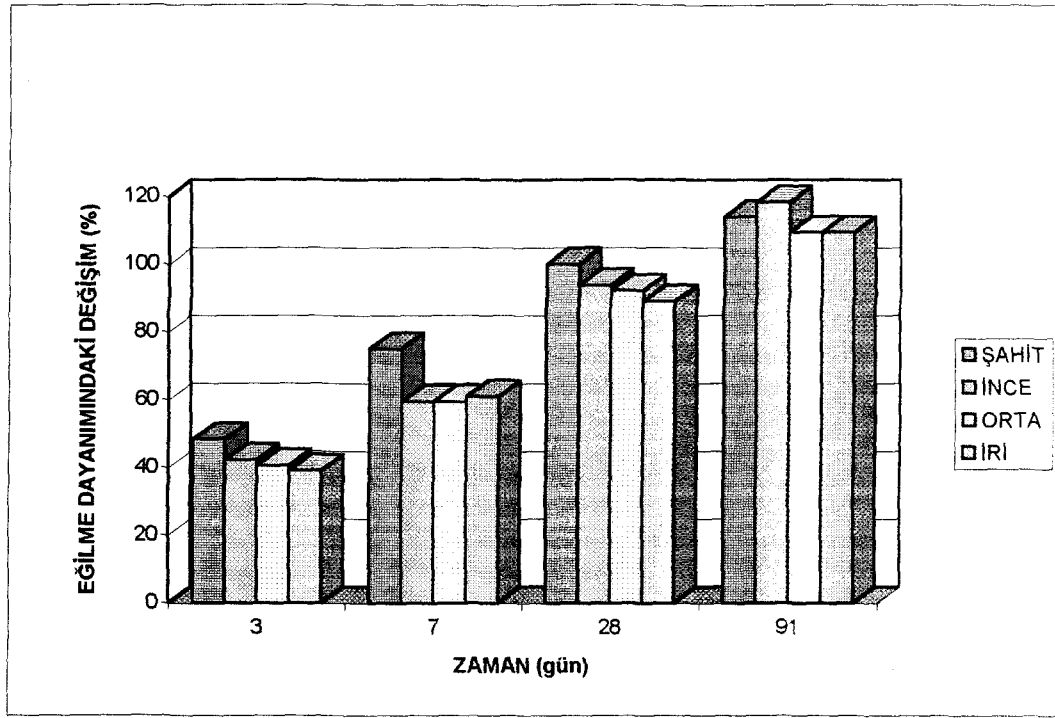


**Şekil 5.21** İri Uçucu Kül İçeren Serilerde İkame Oranına göre Eğilme Dayanımındaki Değişim

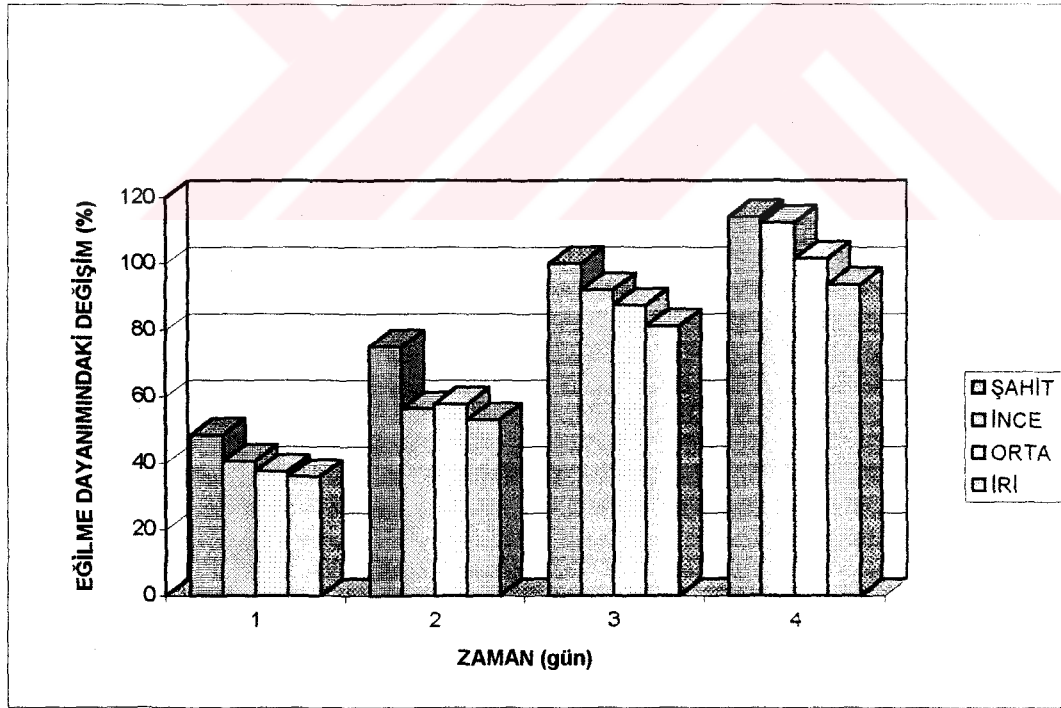
Basınç dayanımında olduğu gibi şahit eğilme dayanımını 100 birim kabul etmek suretiyle farklı inceliklerdeki serilerin zamana bağlı eğilme dayanımı değerleri 28 günlük şahit eğilme dayanımının yüzdesi olarak ifade edildiğinde incelik faktörünün eğilme dayanımı üzerindeki etkisi daha net net şekilde gözlenmektedir. Farklı ikame oranları için bu tip bir değerlendirmeyi yansıtan tablo ve grafik ifadeler Tablo 5.5, Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24 de gösterilmiştir.

**Tablo 5.5** 28 Günlük Şahit Eğilme Dayanımının Yüzdesi Olarak Zamana Bağlı Eğilme Dayanımları

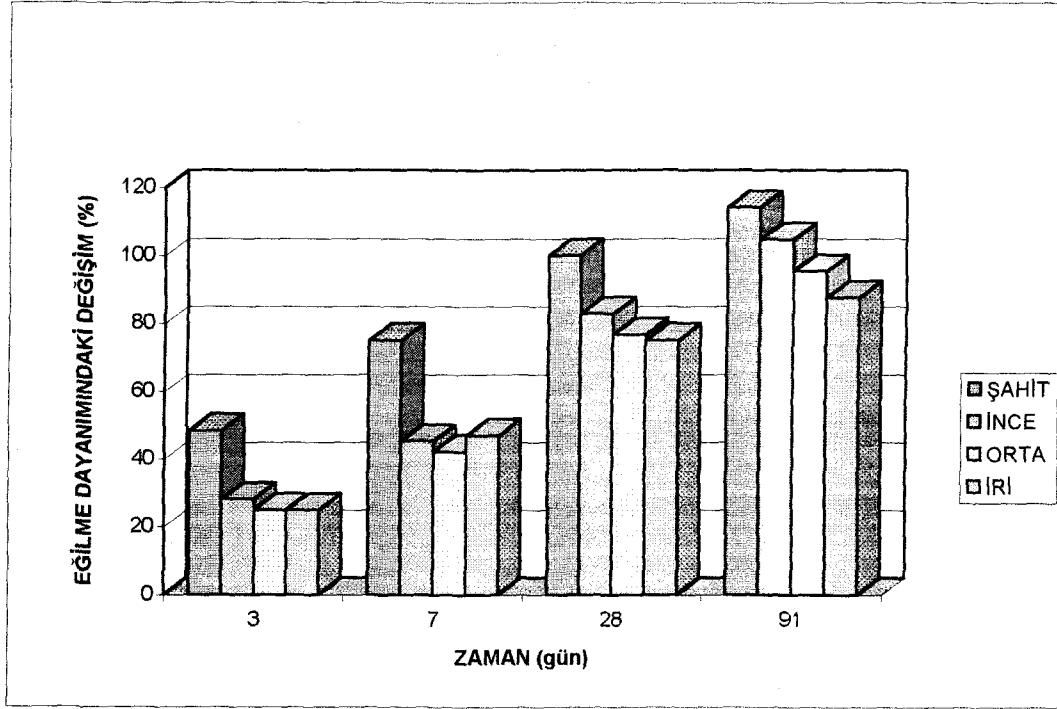
| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Eğilme Dayanımı (%) |       |        |        |
|--------------------|------------------------|---------------------|-------|--------|--------|
|                    |                        | 3 GÜN               | / GÜN | 28 GÜN | 91 GÜN |
| -                  | 0                      | 48.4                | 75    | 100    | 114.1  |
| İnce               | 10                     | 42.2                | 59.4  | 93.8   | 118.8  |
| Orta               | 10                     | 40.6                | 59.4  | 92.2   | 109.4  |
| İri                | 10                     | 39.1                | 60.9  | 89.1   | 109.4  |
| İnce               | 20                     | 40.6                | 56.3  | 92.2   | 112.5  |
| Orta               | 20                     | 37.5                | 57.8  | 87.5   | 101.6  |
| İri                | 20                     | 35.9                | 53.1  | 81.3   | 93.8   |
| İnce               | 30                     | 28.1                | 45.3  | 82.8   | 104.7  |
| Orta               | 30                     | 25                  | 42.2  | 76.6   | 95.3   |
| İri                | 30                     | 25                  | 46.9  | 75     | 87.5   |



**Şekil 5.22** %10 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Eğilme Dayanımına Oranla Yaşa Bağlı Olarak Kazandıkları Eğilme Dayanımları

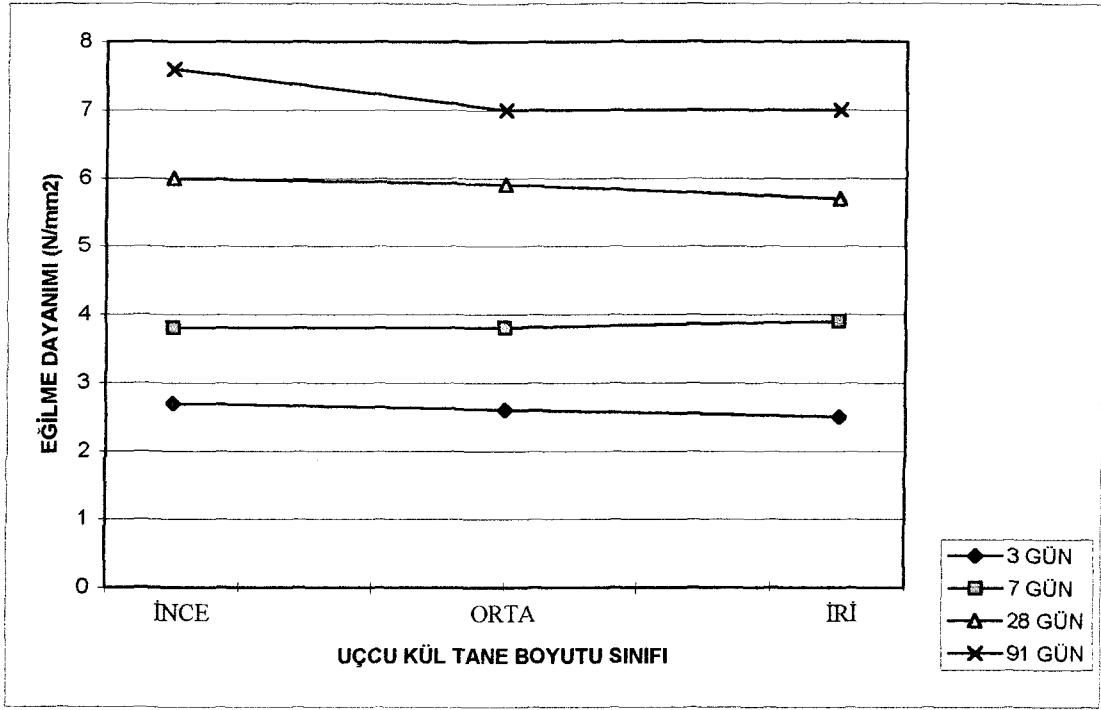


**Şekil 5.23** %20 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Eğilme Dayanımına Oranla Yaşa Bağlı Olarak Kazandıkları Eğilme Dayanımları

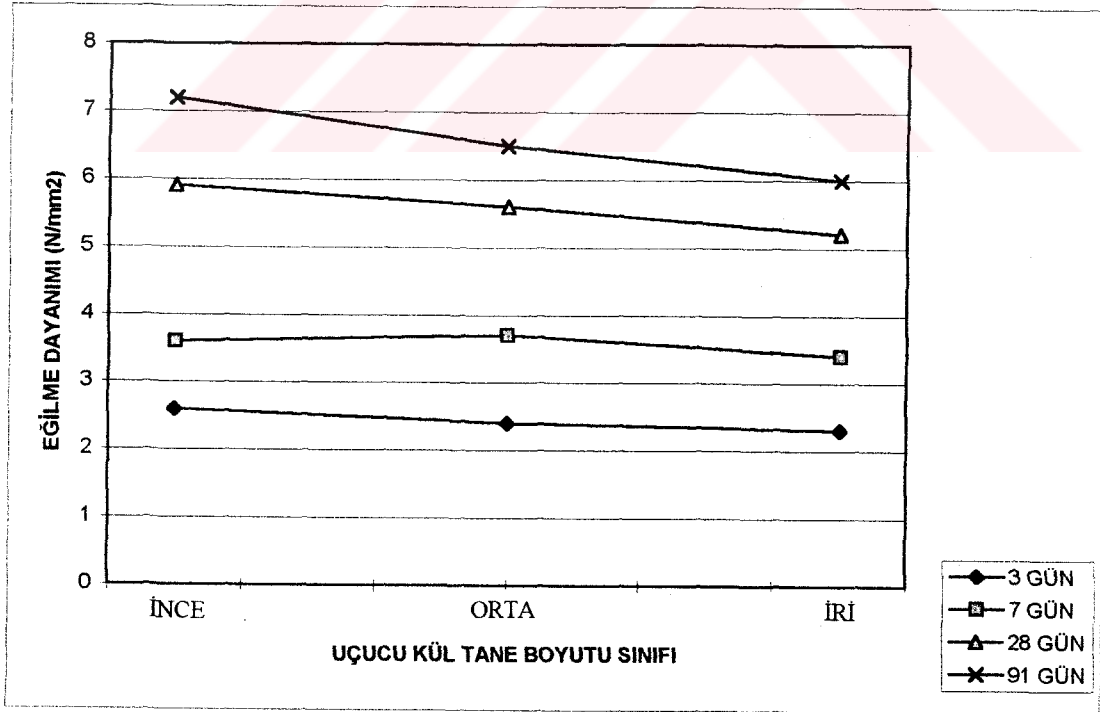


**Şekil 5.24** %30 İkame Oranlı Serilerin 28 Günlük Şahit Eğilme Dayanımına Oranla Yaşa Bağlı Olarak Kazandıkları Eğilme Dayanımları

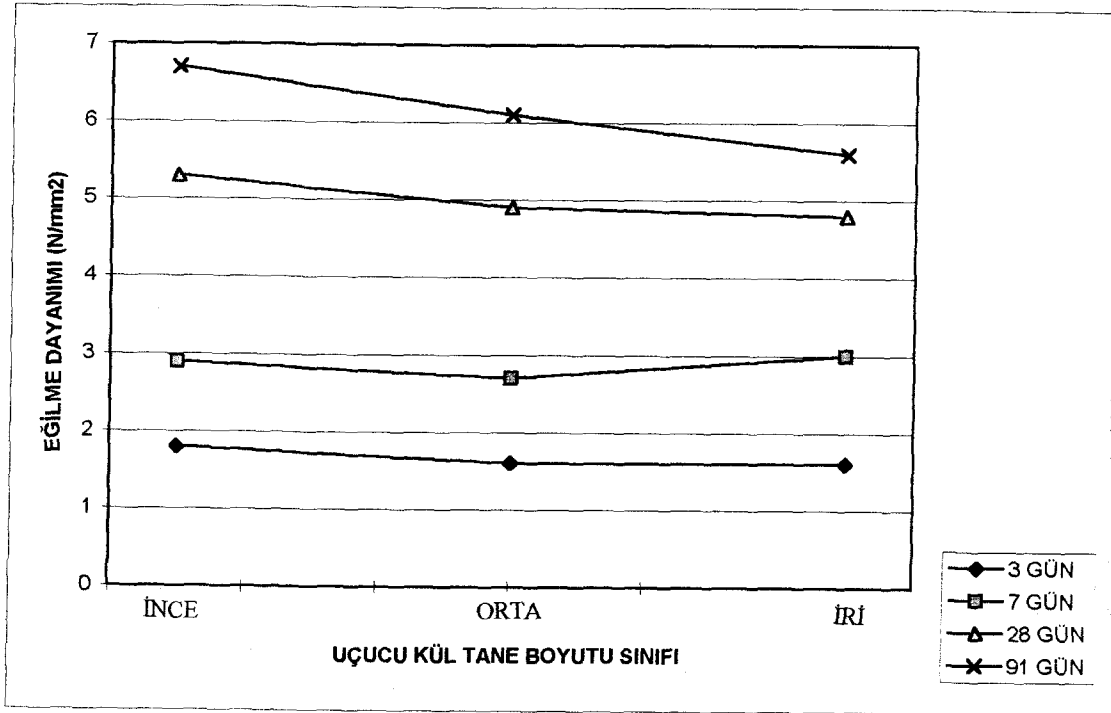
Diğer ifade tarzı ile incelik değişimine bağlı olarak yaşa göre eğilme dayanımlarının aldığı değerler her ikame oranı için grafik olarak Şekil 5.25 , Şekil 5.26 ve Şekil 5.27 de gösterilmiştir. Bu üç grafiğin yorumunda basınç dayanımına benzer şekilde yapılabilir. Uçucu küllü betonların zamana bağlı basınç dayanımı kazanma davranışları ile eğilme dayanımı kazanma davranışları arasında bir paralelliğin olduğu net olarak görülmektedir.



Şekil 5.25 %10 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Eğilme Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Karşılaştırılması



Şekil 5.26 %20 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Eğilme Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Karşılaştırılması



**Şekil 5.27** %30 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Eğilme Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Karşılaştırılması

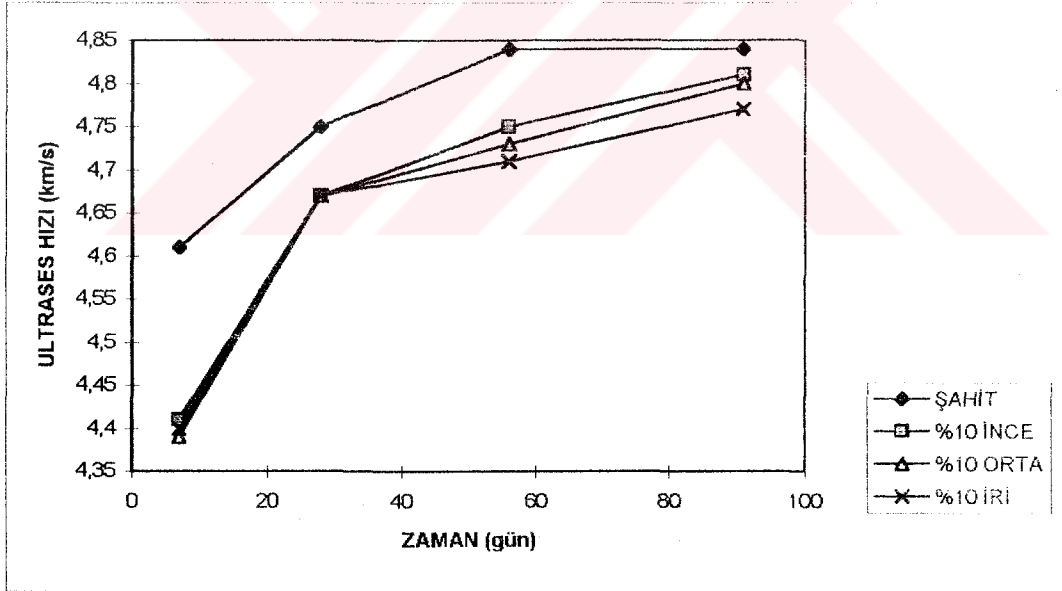
Eğilme dayanımı neticeleri ile yapılan değerlendirmelerden eğilme dayanımı ile basınç dayanımı verileri arasında net bir paralellik olduğu rahatlıkla gözlenebilmektedir. Eğilme dayanımı bakımından da 3 ve 7 günlük erken yaşlara ait değerlerde incelik faktörünün anlamlı bir etkisi görülmemektedir. 28. ve 91. günlere ait değerlerde uçucu kül inceliğinin etkisi bariz olarak ortaya çıkmıştır. Yine basınç dayanımındaki gibi nihai dayanım (91. günde) bakımından en iyi performansı %10 ikame oranında ince uçucu kül içeren seri göstermiş, aynı yaştaki şahit eğilme dayanımını sadece bu seri aşabilmiştir. Bunun ötesinde ikame oranı arttıkça hem eğilme dayanımı değerleri düşmüş hem de incelik faktörünün etkisi daha belirgin halde ortaya çıkmıştır.

### 5.2.3 Ultrases Hızı

Önceki bölümde Tablo 4.4 de verilmiş olan ultrases hızı değerleri uçucu kül inceliğine ve ikame oranına bağlı olarak aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir.

#### Farklı İnceliklerdeki %10 İkame Oranlı Serilerin Ultrases Hızlarının Yaşa Bağlı Karşılaştırılması :

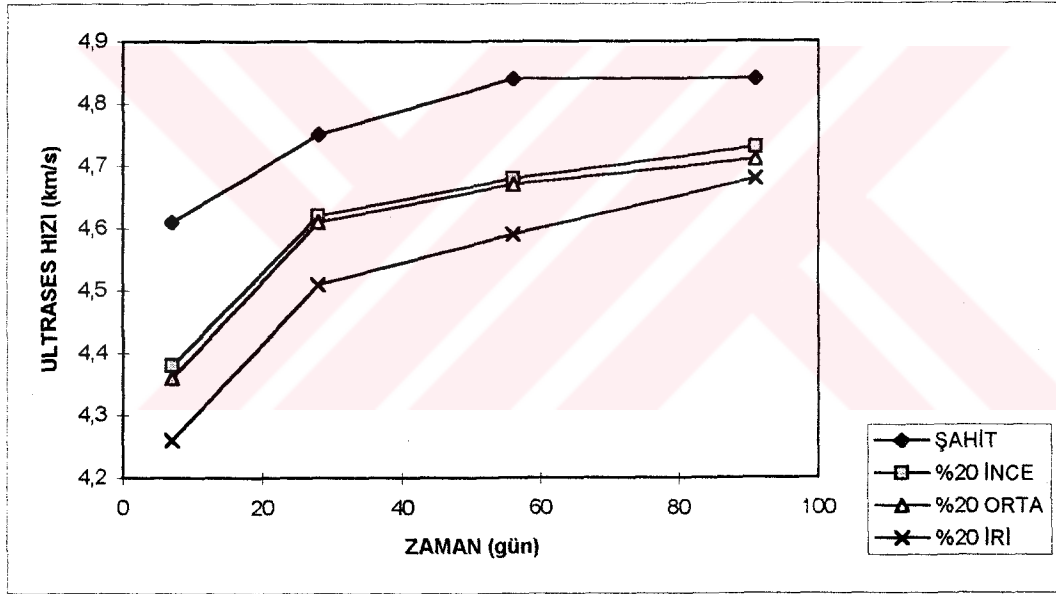
Hiçbir %10 ikame oranlı serinin ultrases hızı şahit ultrases hızına ulaşamamıştır. Özellikle 28. güne kadar %10 ikame oranlı serilerin ultrases hızlarının birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. İncelik faktörünün önemli mertebede bir etkisi saptanmamıştır. Bu verileri kapsayan grafik ifade Şekil 5.28 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.28** Farklı İnceliklerdeki %10 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Ultrases Hızları Arasındaki İlişki

**Farklı İnceliklerdeki %20 İkame Oranlı Serilerin Ultrases Hızlarının Yaşa Bağlı Olarak Karşılaştırılması :**

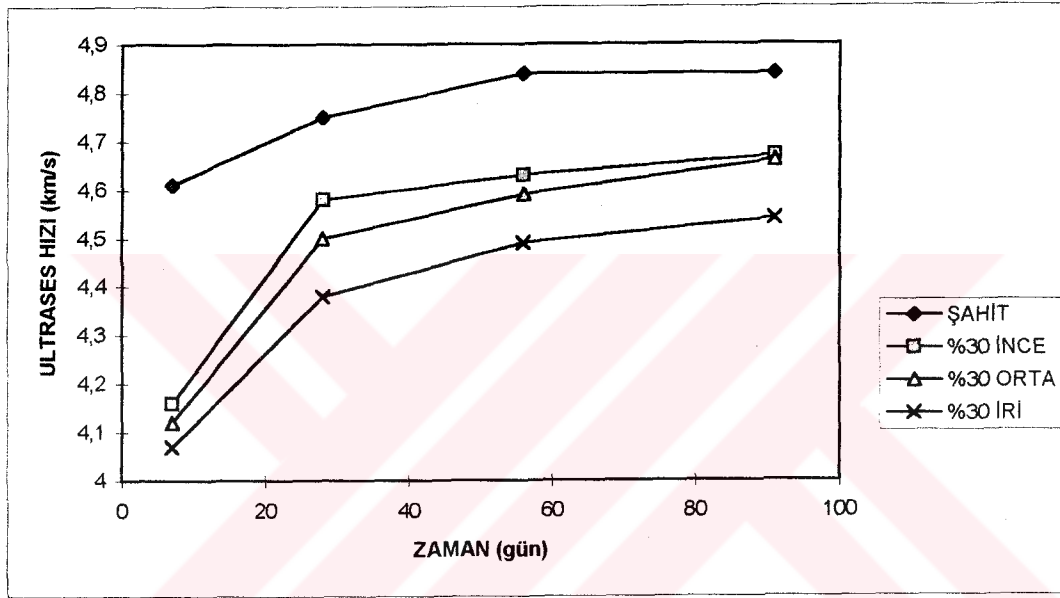
%20 İkame oranlı serilerde ince ve orta incelikte uçucu kül içeren serilerin ultrases hızları birbirlerine yakın değerler almışlardır. İri uçucu kül içeren seri erken yaşlarda bile diğer serilerin ultrases hızlarının altında kalmıştır. Bu gruba ait seriler %10 ikame oranlı serilerle karşılaştırıldığında ikame oranının artmasıyla farklı inceliklerdeki serilerin ultrases hızları arasındaki farkların da daha belirgin olarak arttığı gözlenmektedir. Bu verileri yansıtan grafik ifade Şekil 5.29 da gösterilmiştir.



**Şekil 5.29** Farklı İnceliklerdeki %20 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Ultrases Hızları Arasındaki İlişki

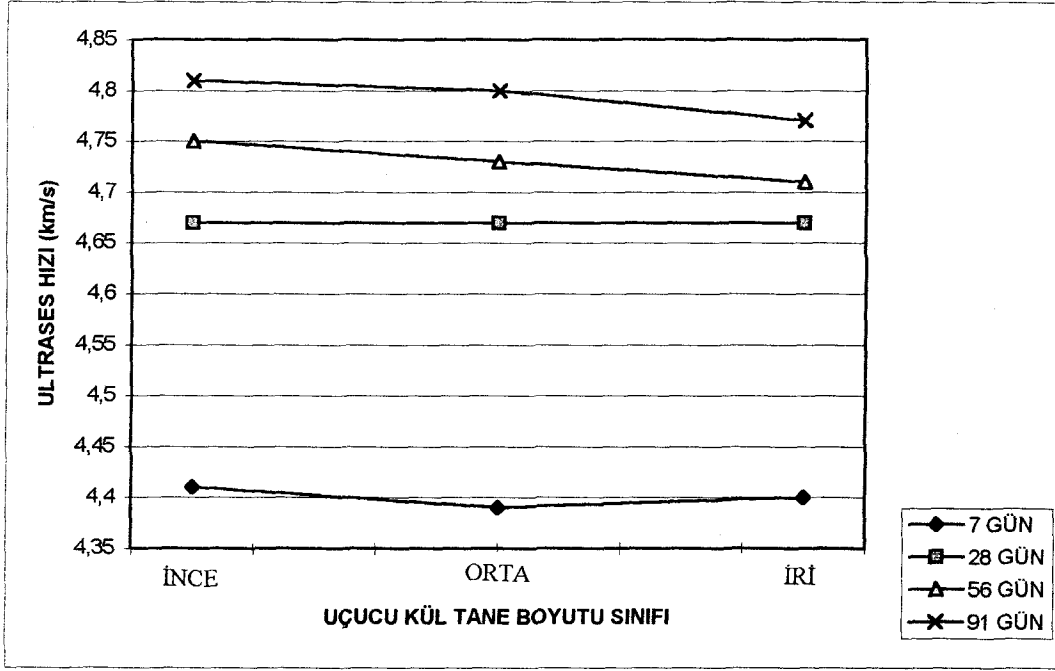
**Farklı İnceliklerdeki %30 İkame Oranlı Serilerin Ultrases Hızlarının Yaşa Bağlı Olarak Karşılaştırılması :**

%30 ikame oranlı serilerde ileriki yaşlarda orta incelikte uçucu kül içeren seri yine ince uçucu kül içeren serinin ultrases hızına yakın değerler almıştır. Diğer ikame oranlarına göre seriler arasındaki ultrases hızları farkları daha da artmıştır. Bu verileri ifade eden grafik Şekil 5.30 da gösterilmiştir.

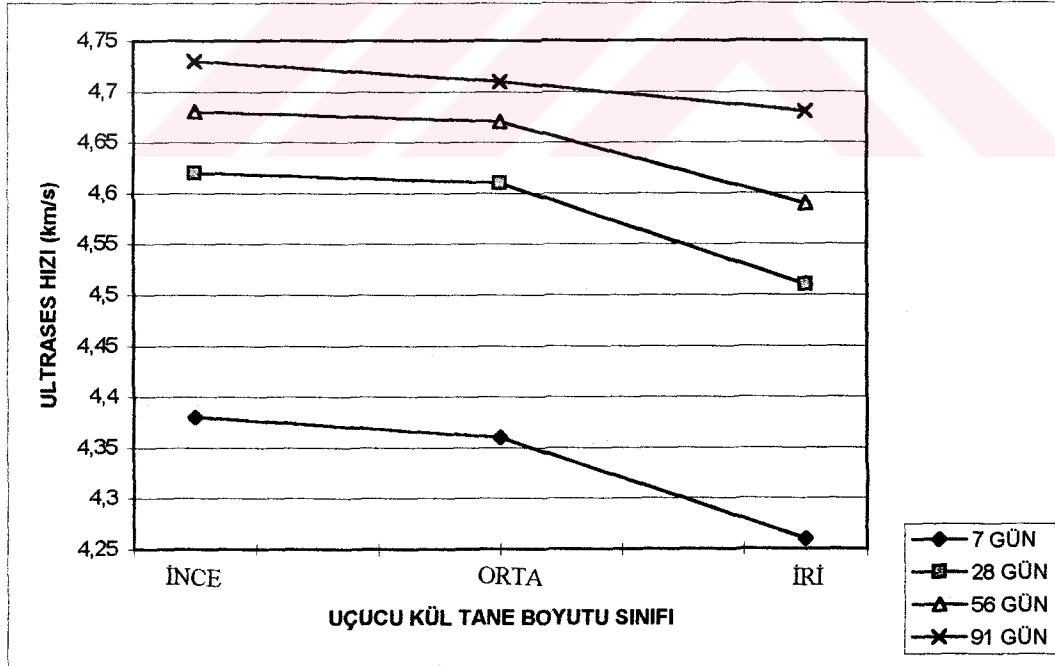


**Şekil 5.30** Farklı İnceliklerdeki %30 İkame Oranlı Serilerin Zamana Bağlı Olarak Ultrases Hızları Arasındaki İlişki

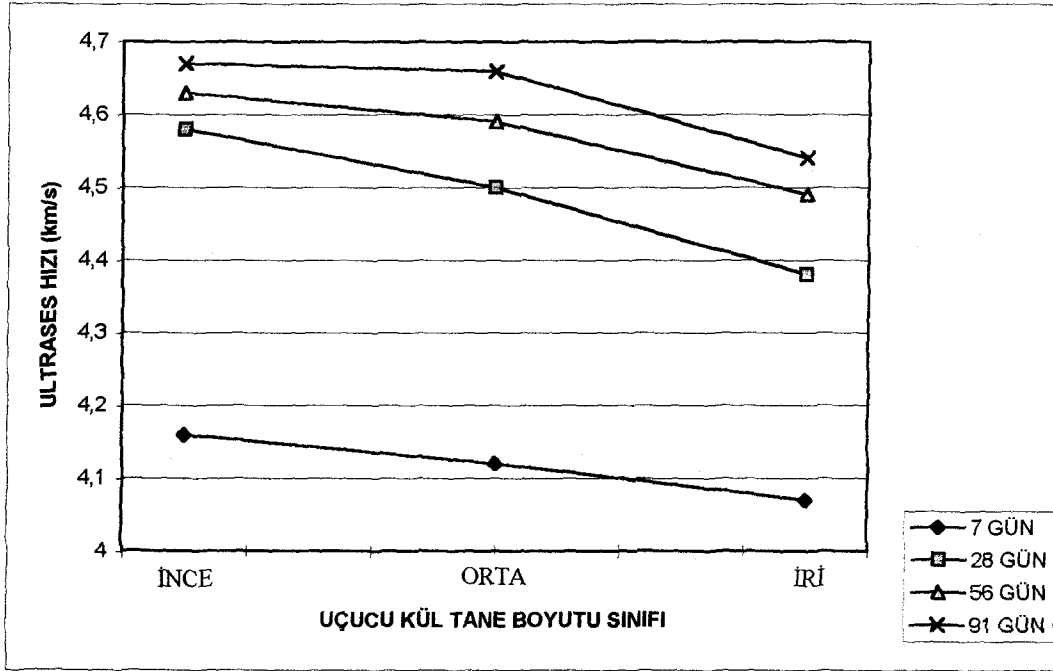
Yine incelik değişimine bağlı olarak yaşa göre ultrases hızlarının aldığı değerler her ikame oranı için grafik olarak Şekil 5.31 , 5.32 ve 5.33 de gösterilmiştir. Bu üç grafik birlikte yorumlandığında %10 ikame oranı için incelik faktörünün pek anlamlı bir etkisi görülmemektedir. Bunun üzerindeki ikame oranlarına ait grafikler incelendiğinde 7. günde de 28. günde de artan iriliğe bağlı olarak ultrases hızında bir azalma göze çarpmakta, buna bağlı olarak eğriler negatif bir eğim kazanmaktadır. Daha ileriki yaşlarda ( 56. ve 91. günlerde ) bütün ikame oranları için incelik faktörünün etkisi daha net ortaya çıkmakta, ikame oranı arttıkça eğrilerin negatif eğimlerinin de artmakta olduğu göze çarpmaktadır.



**Şekil 5.31** %10 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Ultrases Hızlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması



**Şekil 5.32** %20 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Ultrases Hızlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması



**Şekil 5.33** %30 İkame Oranlı Farklı İnceliklerdeki Serilerin Ultrases Hızlarının Yaşa Göre Karşılaştırılması

#### 5.2.4 Dinamik Elastisite Modülü

Üretilen her seriye ait numunelerin 28. ve 91. günlerde ölçülmüş ultrases hızları ve birim ağırlık değerlerinden yararlanarak aşağıdaki formül ile dinamik elastisite modülleri hesaplanmıştır. Hesaplanan dinamik elastisite modülü değerlerini, hesapta kullanılan ultrases hızı ve birim ağırlık değerlerini içeren veriler Tablo 5.6 de gösterilmiştir.

$$E_d = 10^5 \cdot V^2 \cdot \frac{\Delta}{g} \quad (3.1)$$

$E_d$  = Dinamik elastisite modülü

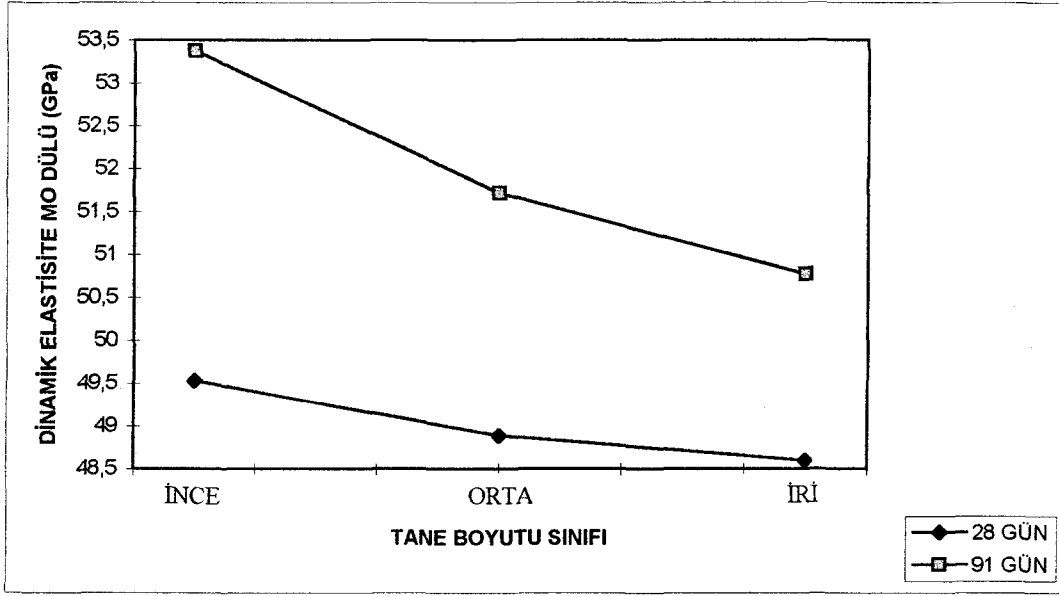
$V$  = Ultrases hızı

$\Delta$  = Birim ağırlık

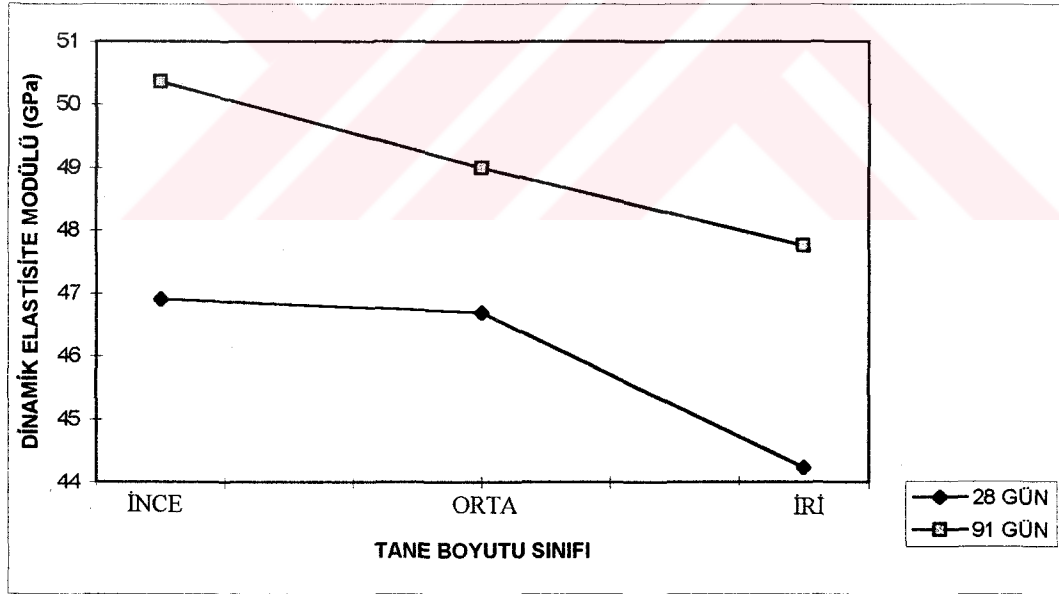
**Tablo 5.6** Ultrases hızı, birim ağırlık ve bu değerlere bağlı olarak hesaplanan dinamik elastisite modülü değerleri

| Tane Boyutu Sınıfı | U.K. İkame Yüzdesi (%) | Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) |        | Ultrases Hızı (km/s) |        | D. Elastisite Modülü (GPa) |        |
|--------------------|------------------------|------------------------------------|--------|----------------------|--------|----------------------------|--------|
|                    |                        | 28 GÜN                             | 91 GÜN | 28 GÜN               | 91 GÜN | 28 GÜN                     | 91 GÜN |
| -                  | 0                      | 2234                               | 2258   | 4.75                 | 4.84   | 51.38                      | 53.92  |
| İnce               | 10                     | 2228                               | 2263   | 4.67                 | 4.81   | 49.53                      | 53.37  |
| Orta               | 10                     | 2199                               | 2202   | 4.67                 | 4.80   | 48.89                      | 51.72  |
| İri                | 10                     | 2186                               | 2189   | 4.67                 | 4.77   | 48.60                      | 50.77  |
| İnce               | 20                     | 2156                               | 2208   | 4.62                 | 4.73   | 46.91                      | 50.36  |
| Orta               | 20                     | 2155                               | 2167   | 4.61                 | 4.71   | 46.69                      | 49.00  |
| İri                | 20                     | 2133                               | 2139   | 4.51                 | 4.68   | 44.23                      | 47.76  |
| İnce               | 30                     | 2149                               | 2174   | 4.58                 | 4.67   | 45.95                      | 48.33  |
| Orta               | 30                     | 2129                               | 2142   | 4.50                 | 4.66   | 43.95                      | 47.42  |
| İri                | 30                     | 2104                               | 2112   | 4.38                 | 4.54   | 41.15                      | 44.37  |

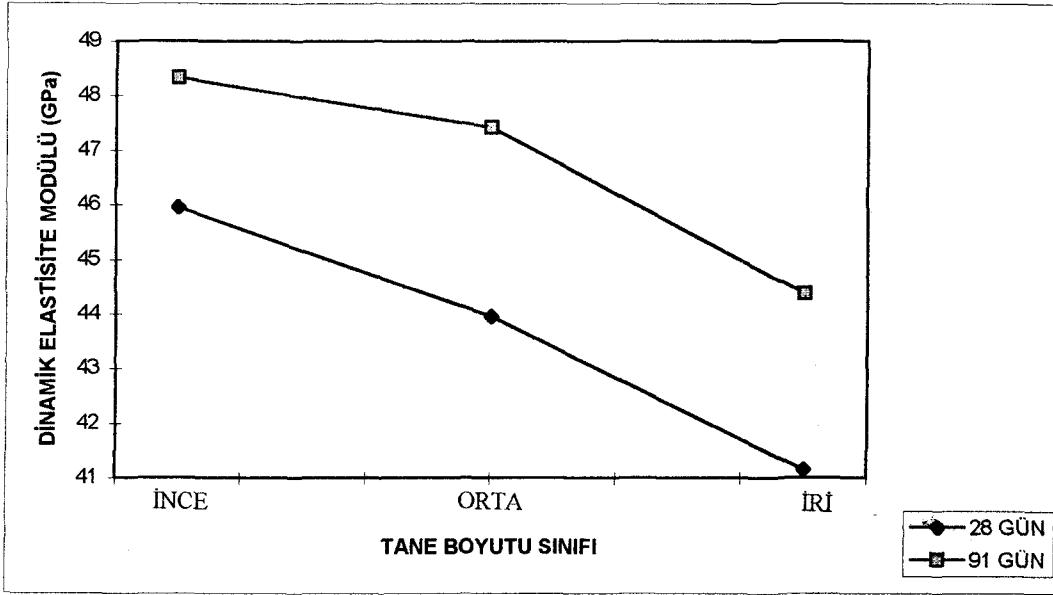
İncelik değişimine bağlı olarak yaşa göre dinamik elastisite modüllerinin aldığı değerler her ikame oranı için grafik olarak Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36 da gösterilmiştir. Grafikler birlikte yorumlandığında 28. günde de 91. günde de uçucu kül irileştikçe dinamik elastisite modülünün azaldığı anlaşılmaktadır. Ancak 28 günlük değerlerde en düşük %10 ikame oranı için diğer ikame oranlarına nazaran incelik faktörüne bağlı farkın daha az olduğu dikkati çekmektedir. Bir başka deyişle %10 ikame oranlı serinin 28. günde irilik arttıkça kazandığı negatif eğim diğer ikame oranlarına nazaran daha azdır.



**Şekil 5.34** %10 İkame Oranlı Serilerin Dinamik Elastisite Modüllerinin İncelik Faktörüne Bağlı Olarak Karşılaştırılması



**Şekil 5.35** %20 İkame Oranlı Serilerin Dinamik Elastisite Modüllerinin İncelik Faktörüne Bağlı Olarak Karşılaştırılması



**Şekil 5.36** %30 İkame Oranlı Serilerin Dinamik Elastisite Modüllerinin İncelik Faktörüne Bağlı Olarak Karşılaştırılması

### 5.2.5 Kılcal Su Emme, Görünen Porozite ( Hacimce Su Emme ) ve Birim Ağırlık

28. ve 91. günlerde yapılmış olan su emme deneyleri sonucunda elde edilen veriler Bölüm 4 Tablo 4.5 de gösterilmiş idi.

Serilerin yaşa bağlı olarak sahip oldukları kapillarite katsayıları incelendiğinde 28 günlük değerlerde uçucu küllü betonların şahit betona nazaran kapiller olarak daha fazla su emdiği görülmektedir. Ancak 91. güne gelindiğinde %10 ve %20 ikame oranlarında ince uçucu kül içeren seriler şahite göre daha iyi performans göstermişlerdir. Bunun haricindeki uçucu küllü serilerin ikame oranı ve irilik arttıkça kılcal su emme katsayıları da artmıştır.

Hacimce su emme yüzdeleri incelendiğinde kılcallık verileri ile paralellik kurulabilecek sonuçlar göze çarpmaktadır. Uçucu kül iriliği ve ikame oranı arttıkça hacimce emilen su miktarı da artmıştır. Orta incelikte ve iri uçucu kül içeren serilerin 28 günlük hacimce su emme değerlerinde 91. güne gelindiğinde diğer serilere nazaran ciddi bir azalmanın olmadığı anlaşılmaktadır.

Birim ağırlık değerlerinin genel görünüşünden uçucucu küllü seriler için ikame oranı ve irilik arttıkça birim ağırlıkların azalmış olduğu yorumu yapılabilmektedir. Birim ağırlık değerleri ile kılcallık verileri arasında da ilişki kurulabilecek bir değerlendirme yapılabilir. Tablo 4.5 de görüldüğü gibi %10 ikame oranında ince uçucu kül içeren serinin birim ağırlığı 28. günde şahite nazaran daha düşükken 91. güne gelindiğinde şahitinkini aşmıştır. Bu durum %10' luk ince uçucu kül ikamesinin ileriki yaşlarda bağlayıcı bileşenlerin formasyonuna katkıda bulunarak betonun boşluk sistemini iyileştirdiği şeklinde yorumlanabilir. Bu iyileşme kılcal boşlukları da kapsayacağından betonun ileriki yaşlardaki kılcal su emmesinin azalması doğal görünmektedir.

91. günde ince uçucu kül içeren 3 serinin de birim ağırlıklarının 28. güne nazaran belirgin olarak arttıkları görülmektedir. Diğer inceliklerdeki seriler incelendiğinde 28. ve 91. günlere ait birim ağırlık değerlerinin dikkat çekici farklılıklara sahip olmadıkları anlaşılmaktadır. Bu değerlendirme ışığında orta incelikte ve iri uçucu kül kullanılan serilerin boşluk sistemlerinin, geçen zamana bağlı olarak uçucu kül kullanımından dolayı ince uçucu küllü seriler kadar olumlu etkilenmediği düşünülmektedir.

#### **5.2.6 İslanma-Kuruma Çevriminin Olduğu Deniz Suyu Ortamının Etkisi**

Ortam koşullarına dayanıklılık açısından üretilen beton seriler hakkında bir değerlendirme yapabilmek maksadı ile her seriye ait numuneler deniz suyu ortamında ıslanma-kuruma çevrimine maruz bırakılmış, bu numunelerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları ve ultrases hızları saptanmıştır. Deniz suyu İstanbul Boğazı kıyısında belirlenen bir mahalden temin edilmiş ve ortam koşullarının sabitliğini sağlamak düşüncesi ile haftada bir yenilenmiştir.

Numuneler üretildikten 24 saat sonra kalıplarından çıkarılmışlar ve doğrudan doğruya 20°C sabit hava sıcaklığının bulunduğu ortamda deniz suyu içeren bir kaba konulmuşlardır. Bu halde bir hafta bekletilen numuneler daha sonra deniz suyundan çıkartılıp havada muhafaza edilmiş, böylece 1 hafta periyotlu bir ıslanma-kuruma çevrimi meydana getirilmiştir. Yukarıda sözü edilen sertleşmiş beton testleri basınç ve

eğilme dayanımları için 28 ve 91. günlerde, ultrases hızı için 7, 28, 56 ve 91. günlerde yapılmış, elde edilen değerler Tablo 4.6 , Tablo 4.7 ve Tablo 4.8 de verilmiştir.

Bu tablolardaki veriler incelendiğinde incelik faktörüne bağlı olarak deniz suyuna maruz serilerin bu ortamdaki performanslarını karşılaştırmanın güç olduğu görülmektedir. Deniz suyu ortamında saklanan numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ile ultrases hızları standart kür koşullarında saklanan numunelerinkine nazaran daha düşük değerler almışlardır. Ancak uçucu kül inceliğine ve ikame oranına bağlı olarak azalmanın nispeti, seriler arasında ilişki kurmaya yetecek kadar belirgin değildir. Buna karşın farklı ortam koşullarına ait basınç ve eğilme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında ( Tablo 4.6 ve Tablo 4.7 ) genel görünüş itibariyle eğilme dayanımının ıslanma - kuruma çevriminin sözkonusu olduğu deniz suyu ortamından daha çok etkilendiği dikkati çekmektedir. Standart koşullardaki dayanım değerlerine kıyasla eğilme dayanımı değerlerindeki kayıplar basınç dayanımına nazaran daha ciddi boyuttadır. Bu saptamanın sebebi hakkında şöyle bir yorum getirilebilir: Deniz suyu ortamında ıslanma-kuruma çevrimine maruz bırakılan numunelerde mikroçatlakların gelişimi sözkonusu olabilir. Bilindiği gibi basınç altında mikroçatlaklar kapanarak uygulanan yük çatlağın bir yüzünden diğer yüzüne geçebilmektedir. Çekme etkisinde ise bu çatlaklar daha da yayılarak kırılmayı etkileyen kritik bir durum meydana getirirler. Bu konu ile ilgili daha gerçekçi yaklaşımlarda bulunabilmek açısından başka kapsamlı çalışmaların yapılmasında fayda görülmektedir.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR

Konu ile ilgili olarak çalışmanın başında sunulan önceki araştırmaların ve yapılan deneysel çalışmaların ışığında saptanan bulgulardan aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

1- Bir çok faktör gibi incelik faktörü de uçucu külün üniformluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Seyitömer uçucu külü kullanılarak yapılan bu çalışmada, elde edilen uçucu kül analiz sonuçları aynı kaynağa ait uçucu küllerin incelik farkına bağlı olarak fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değişmekte olduğunu göstermektedir. Seyitömer külü ile yapılmış önceki çalışmalarda da bu özelliklerin değişkenlik gösterdiği, üniformluğun söz konusu olmadığı görülmektedir. Örneğin, uçucu kül üniformluğunun bir ölçüsü olarak ASTM C618-80 standartı uçucu kül özgül ağırlığındaki değişimi maksimum %5 ile sınırlamıştır. Halbuki bu çalışmada ve Seyitömer uçucu külü kullanılarak yapılmış diğer araştırmalarda özgül ağırlığın 1.89-2.46 gr/cm<sup>3</sup> gibi geniş bir aralıkta değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Çalışmada kullanılan üç değişik incelikteki uçucu küle ait analizlerden elde edilen bulgulara göre kül irileştikçe fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki değişikliklere bağlı olarak özgül ağırlığın azaldığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu sonuç kömür kaynağının aynı olmasına rağmen termik santraldaki kömürü öğüten değirmen ve yanma ünitesi gibi kazan karakteristiklerinin teknolojik performanslarındaki olası farklılıkların incelik bakımından uçucu külün üniformluğunu bozabileceği ihtimalini akla getirmektedir.

2- TS 639' a uygun olarak yapılan puzolanik aktivite deneyinin Seyitömer uçucu külü gibi su ihtiyacını önemli mertebede artıran uçucu küller için pek elverişli olmadığı düşünülmektedir. TS 639' da öngörülen karışım oranları ile bu tür küller kullanıldığında yerleştirilemez kıvamda harçlar üretilmektedir. Uçucu kül irileştikçe su ihtiyacının artması ile problem daha da büyümektedir. Uçucu külün kimyasal ve

mineralojik kompozisyonu ne kadar zengin olursa olsun sadece su ihtiyacından ötürü puzolanik aktivitesinin yetersiz olduğu hükmü verilebilmektedir. Uçucu külün su ihtiyacı yönünden harçlarda gösterdiği davranış ile betonda gösterdiği davranışın birbirine paralellik göstermediği bilinmesi gereken önemli bir diğer gerçektir. Uçucu külden dolayı betonun su ihtiyacı harçtaki kadar artmamaktadır. Bu gerekçeler doğrultusunda TS 639'daki puzolanik aktiviteyi test etme yönteminin ne derece gerçekçi olabileceği tartışmaya açık görünmektedir.

3- Uçucu kül inceliğinin ve ikame oranının taze betonun su ihtiyacı üzerindeki etkileri incelenerek aşağıdaki sonuçlara varılmıştır :

- Uçucu kül irileştikçe ve ikame oranı arttıkça taze betonun su ihtiyacı artmaktadır.
- %10 ikame oranında farklı inceliklerde uçucu kül içeren serilerin su ihtiyaçları aynı olmuştur. %10 gibi düşük ikame oranlarında taze betonun su ihtiyacına incelik faktörünün etkisi görülmemektedir. İkame oranı arttıkça etki daha bariz olarak ortaya çıkmaktadır.
- Uçucu külün irileştikçe su ihtiyacını artırmasının ana sebebi fiziksel yapıdan kaynaklanmaktadır. Taramalı elektron mikroskobundan elde edilen görüntülere göre ince uçucu kül tanecikleri bilinen tipik küresel forma sahiptirler. Uçucu kül tanecikleri irileştikçe bu küresel formlarını kaybetmektedirler. Dolayısı ile uçucu kül irileştikçe taneciklerin birbiri üzerindeki kayganlaştırıcı etkisi de (Lubricant Effect) azalmaktadır. İri uçucu külün su ihtiyacını artırmasının bir diğer önemli sebebi de taramalı elektron mikroskobunda da açıkça görülen poroz, süngersi, doğal olarak su tutucu bir yapıya sahip olmasıdır. Malhotra da küresel ve yuvarlak uçucu küllerin tane boyutunun 1-150  $\mu\text{m}$  arasında değiştiğini, şekilsiz ve pürüzlü uçucu kül tanelerinin çaplarının ise genelde 150  $\mu\text{m}$ ' den daha büyük olduğunu söyleyerek elde edilen sonuçları destekleyen yorum getirmiştir.

4- İncelik faktörünün betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gelişimi üzerinde benzer etki gösterdiği anlaşılmaktadır. Erken yaşlarda (3 ve 7. günlerde)

inert bir bileşen gibi davranan uçucu kül, tabii olarak incelik faktörünün dayanım gelişimi üzerindeki etkisini yansıtamamaktadır. Bu sebeple erken yaşlarda aynı ikame oranlı uçucu küllü serilerin dayanımları birbirlerine yakın değerler almışlardır. 28. ve 91. günlere ait dayanım değerlerinde ise uçucu kül inceliğinin etkisi fark edilir ölçüde ortaya çıkmaktadır. İleriki yaşlarda incelik değişimine bağlı olarak betonların dayanım düzeyleri arasındaki farklar büyümektedir. Kısaca, basit ikame metodu ile oranlanan uçucu küllü betonlarda uçucu külün bağlayıcı bileşenlerin formasyonuna katkısı net olarak ileriki yaşlarda ortaya çıkmaktadır ve uçucu kül tanecikleri irileştikçe bu katkı önemli ölçüde azalmaktadır. Basınç ve eğilme dayanımları ile ilgili bir diğer ortak sonuçta 91. gündeki dayanım bakımından en iyi performansı %10 ikame oranında ince uçucu kül içeren serinin göstermiş olduğudur. Aynı yaştaki kontrol betonunun hem basınç dayanımını hemde eğilme dayanımını sadece bu seri aşabilmiştir. Dayanım sonuçlarının genel görünüşüne bağlı olarak eğilme dayanımının basıç dayanımına göre uçucu kül ikamesinden az bir farkla da olsa daha olumlu etkilendiği ileri sürülebilir.

5- Ultrases hızı ile ilgili elde edilen bulgulardan %10' luk en düşük ikame oranı için erken ve ileri yaşlarda incelik faktörünün pek anlamlı bir etkisi görülmemektedir. Diğer ikame oranlarında 7 günlük değerler de dahil olmak üzere ultrases hızı değerleri uçucu kül incelik farkından etkilenmektedir ve ikame oranı arttıkça bu etki daha net olarak ortaya çıkmaktadır. İnce ve orta incelikteki uçucu küllü serilerin ultrases hızları birbirine yakın değerler almışken iri uçucu kül kullanılan serilerin ultrases hızı değerlerinde diğerlerine nispeten daha dikkat çekici azalmanın olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte hiçbir uçucu küllü serinin kontrol serinin herhangi bir yaştaki ultrases hızına ulaşamadığı da elde edilen sonuçlar arasındadır. Ultrases hızı verileri yardımıyla tayin edilen 28. ve 91. günlere ait dinamik elastisite modülü değerlerinden uçucu kül irileştikçe dinamik elastisite modülünün azaldığı anlaşılmaktadır. Burada da %10 ikame oranı için diğer ikame oranlarına nazaran incelik faktörüne bağlı farkın daha az olduğu dikkat çekicidir.

6- Kılcallık, hacimce su emme ve birim ağırlık gibi üretilen betonların fiziksel özellikleri hakkında elde edilen verilerinden şu sonuçlar ortaya çıkmıştır:

- 28. güne ait kılcallık verileri uçucu küllü betonların kapiller olarak kontrol betonuna nazaran daha fazla su emdiklerini göstermektedir. Ancak 91. güne gelindiğinde %10 ve %20 ikame oranlarında ince uçucu kül içeren serilerin şahite göre daha iyi performans gösterdikleri anlaşılmaktadır. Bunun haricindeki uçucu küllü serilerde ikame oranı ve irilik arttıkça kılcal su emme katsayıları da artmıştır.
- Hacimce su emme yüzdeleri ile kılcallık verileri arasında paralellik kurulabilecek sonuçlar göze çarpmaktadır. Uçucu kül iriliği ve ikame oranı arttıkça hacimce emilen su miktarı da artmaktadır. Orta incelikte ve iri uçucu kül içeren serilerin 28 günlük hacimce su emme değerlerinde 91. güne gelindiğinde diğer serilere nazaran ciddi bir azalmanın olmadığı anlaşılmaktadır.
- Birim ağırlık değerlerinin genel görünüşünden uçucu küllü seriler için ikame oranı ve irilik arttıkça birim ağırlıkların azalmış olduğu anlaşılmaktadır. Birim ağırlık değerleri ile kılcallık verileri arasında da ilişki kurulabilecek sonuçlara varılabilir. %10 ikame oranında ince uçucu kül içeren serinin birim ağırlığı 28. günde şahite nazaran daha düşükken 91. güne gelindiğinde şahitinkini aşmıştır. Bu durum %10'luk ince uçucu kül ikamesinin ileriki yaşlarda bağlayıcı bileşenlerin formasyonuna katkıda bulunarak betonun boşluk sistemini iyileştirdiği şeklinde izah edilebilir. Bu iyileşme kılcal boşluklarında kapsayacağından betonun ileriki yaşlardaki kılcal su emmesinin azalması doğal görünmektedir. Orta incelikte ve iri uçucu kül kullanılan serilerin boşluk sistemlerinin, geçen zamana bağlı olarak uçucu kül kullanımından dolayı ince uçucu küllü seriler kadar olumlu etkilenmediği düşünülmektedir.

7- Deniz suyu ortamında ıslanma-kuruma çevrimine maruz bırakılmış uçucu küllü serilerin incelik faktörüne bağlı olarak sözkonusu ortam koşullarına karşı gösterdikleri performansları ayırdedecek ölçüde bulgu elde edilememiştir. Deniz suyu ortamında saklanan numunelerin basınç ve eğilme dayanımları ile ultrases hızları standart kür koşullarında saklanan numunelerinkine nazaran daha düşük değerlerdedir. Ancak uçucu kül inceliğine ve ikame oranına bağlı olarak azalmanın nispeti, seriler arasında ilişki kuracak kadar belirgin değildir. Buna karşın farklı ortam koşullarına ait basınç ve eğilme dayanımı değerleri karşılaştırıldığında genel görünüş

itibariyle eğilme dayanımının ıslanma-kuruma çevriminin söz konusu olduğu deniz suyu ortamından daha çok etkilendiği dikkati çekmektedir. Standart koşullardaki dayanım değerlerine kıyasla eğilme dayanımı değerlerindeki kayıplar basınç dayanımına nazaran daha ciddi boyuttadır. Bu sonuca bağlı olarak deniz suyu ortamında ıslanma-kuruma çevrimine maruz betonların iç yapısında mikroçatlakların gelişimi olabileceği varsayılmaktadır. Bu konu ile ilgili daha gerçekçi yaklaşımlarda bulunabilmek açısından başka kapsamlı çalışmaların yapılmasında fayda görülmektedir.

Uçucu kül inceliğinin puzolanik aktiviteyi etkileyen en önemli fiziksel özelliklerden biri olduğunu son kez vurgulamakta yarar vardır. Uçucu külün inceliğini ölçmek için kullanılan farklı tekniklerin her biri doğal olarak farklı sonuçlar vermektedir. Bu sebeple inceliğin puzolanik aktivite üzerindeki etkisini açıklamak güçleşmektedir. İncelik faktörünün etkisi üzerine yapılan çalışmalar gerçekleştirildikleri koşullar içerisinde değerlendirilmelidirler. Bir çok faktöre bağlı olarak kendi içinde zaten değişkenlik gösteren uçucu kül, test edildiği yöntemlerin çeşitliliği nedeni ile dağınık ve yanıltıcı sonuçlara açık bir malzemedir. Bu tip endüstriyel atıkların bir enstitü çatısı altında çok yönlü ve en önemlisi tekrarlı olarak incelenmesinde ve araştırılmasında büyük fayda görülmektedir. Deneysel çalışmalardan dağınık olmayan, birbirini destekleyen sonuçlar almanın ve atık malzemeyi sürekli kontrol altında tutmanın ancak böyle bir yaklaşımla mümkün olacağına inanılmaktadır. İnşaat sektörünün, değerlendirilmeyi bekleyen bu malzemelere yeterince güven duyabilmesi için bu tür yaklaşımların vakit kaybedilmeden hayata geçirilmesi gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] BERRY, E.E., and MALHOTRA, V.M., Fly Ash in Concrete, CANMET, Ottawa, 1986
- [2] ÖZTURAN, T., “Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği”, 2. Ulusal Beton Kongresi, 1991, İstanbul
- [3] ASTM C618-78, Specification for Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, 1978
- [4] ERDOĞAN, T., “Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 1993, Ankara
- [5] DODSON, V.H., Concrete Admixtures, VNR Structural Engineering Series New York, 1990
- [6] TOKYAY, M., “Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi)”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 1993, Ankara
- [7] ÖZTEKİN, E., İleri Beton Teknolojisi Ders Notları, Sakarya , 1995
- [8] AKMAN, M.S., Yapı Malzemeleri, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1990
- [9] ACI Committee 226, “Use of Fly in Concrete”, ACI Materials Journal, pp. 381-409, 1987
- [10] AKMAN, M.S., ÖZTEKİN, E., ERDİNÇ, M., “Düşük Çimento Dozajlı ve Uçucu Kül Katkılı Hazır Betonlarda Dayanım ve Dayanıklılık”, 3. Ulusal Beton Kongresi, 1994, İstanbul
- [11] EPRI TR-100473, “High-Volume Fly Ash Concrete Technology”, Final Report, The University of Wisconsin, Milwaukee, 1992
- [12] NEVILLE, A.M., Properties of Concrete, Longman Scientific & Technical, England, 1994
- [13] POSTACIOĞLU, B., Yapı Malzemesi Dersleri, Teknik Üniversite Matbaası, Gümüşsuyu, 1975
- [14] ÖZTURAN, T., “Uluslararası IV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumani, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, 1993

- [15] **AKMAN, M.S.**, Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul, 1992
- [16] **AKMAN, M.S.**, “Ağırlık Barajlarında Uçucu Küllü Beton Kullanımı”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, 1993
- [17] **ÖZSOY, Ş.**, “Beton Sınıfları Dağılımı ve Mamül Çeşitliliği”, 3. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 1994
- [18] **ÖZTEKİN, E., SÜMER, M.**, “Uçucu Küllü ve Fillerli Betonların Bazı Karşılaştırılmalı Özellikleri”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu”, Ankara, 1993
- [19] **ÖZTEKİN, E. ve KURBETÇİ, Ş.**, “Uçucu Küllü Betonlara Hızlandırılmış Kür Uygulaması”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, 1993
- [20] **RAMYAR, K.**, “Uçucu Küllerin Çimento Harcının Büzülmesine ve Betonun Karbonatlaşmasına Olan Etkileri”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu”, Ankara, 1993
- [21] **ÇEVİK, M.**, “Yüksek Fırın Cürufu ve Uçucu Külden Taşıyıcı Hafif Agrega Üretimi”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, 1993

## ÖZGEÇMİŞ

1971 Yılında İzmir’de doğan Ahmet Gökçe, orta öğrenimini 1988 yılında Ankara Atatürk Lisesinde tamamladı. Aynı yıl Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girerek öğrenim hayatını sürdürdü. 1992 yılında bu bölümden mezun oldu ve İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 1994 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlayan yazar halen bu göreve devam etmektedir.

**İ.Ö. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMAN YATIRIM MENKUL**